Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONACYT Red Temática del Agua

inifap
Red Nacional de Innovación Agua y Suelo

Manejo comparado de cuencas hidrológicas

Incertidumbre climática, vulnerabilidad ecológica y conflicto social

Compiladores y Directores del libro

José Luis González Barrios
Ignacio Sánchez Cohen

Manejo comparado de cuencas hidrológicas

Incertidumbre climática, vulnerabilidad ecológica y conflicto social

Libro científico colectivo

Compiladores y Directores del libro

José Luis González Barrios e Ignacio Sánchez Cohen

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONACYT Red Temática del Agua

inifap
Red Nacional de Innovación Agua y Suelo

Sociedad Mexicana de La Ciencia del Suelo (SMCS)

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)
Red Temática del Agua (RETAC)

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Red Nacional de Innovación Agua y Suelo (RNI Agua y Suelo)

Manejo comparado de cuencas hidrológicas
Incertidumbre climática, vulnerabilidad ecológica y conflicto social

Libro científico colectivo
El contenido de cada capítulo es responsabilidad absoluta de los autores

Primera edición, diciembre de 2009
Tiraje 1000 ejemplares
Impreso y hecho en México

Imagen de portada: Niebla en la cuenca alta del río Nazas.
(Foto: R. Medina Guillén)

Ejemplo de cita

Hernández Alvarado, H., 2009. Dimensión política y social de los problemas regionales del agua. En: González Barrios, J.L., I. Sánchez Cohen (Dir. del libro). Manejo comparado de cuencas hidrológicas. Incertidumbre climática, vulnerabilidad ecológica y conflicto social. Ediciones de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, la Red Temática del Agua CONACYT y la Red Nacional de Innovación Agua y Suelo del INIFAP. Torreón Coahuila, México 282 p

© Derechos reservados

ISBN 978-607-95106-4-0

Prologo

El manejo sostenible de cuencas hidrológicas ante el cambio climático global, la vulnerabilidad de los ecosistemas y los conflictos sociales por la apropiación y uso de recursos naturales, representa uno de los retos más importantes para México y los países en desarrollo.

La necesidad de implementar buenas prácticas de manejo de recursos naturales y leyes eficaces en relación con las necesidades de una población en constante crecimiento, requiere del adecuado soporte científico y cultural para evitar el deterioro del medioambiente, el empobrecimiento económico y el colapso social.

El manejo comparado de cuencas hidrológicas permite compartir experiencias exitosas y problemáticas para proponer modelos de desarrollo que produzcan bienestar, riqueza y viabilidad natural especialmente en torno a las regiones con mayor presión demográfica.

Con esta visión se organizó el simposio "Manejo comparado de cuencas hidrológicas", en el contexto del XXXIV Congreso nacional de la ciencia del suelo, en el que participó un grupo de expertos para presentar experiencias con enfoques multidisciplinarios.

Esta iniciativa con un rico intercambio multi-institucional fue acogida por la Red Temática del Agua del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (RETAC-CONACYT) así como por la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS) y la Red Nacional de Innovación en Agua y Suelo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), que brindaron su apoyo y facilitaron las mejores condiciones para llevarla a cabo. A dichas instituciones y a todas las organizaciones que participaron en el simposio se les agradece su valiosa colaboración.

Los doce temas abordados dentro del simposio son presentados, a continuación en forma de capítulos que conforman este libro, como una visión interdisciplinaria de los problemas del manejo de cuencas hidrológicas en el contexto del cambio climático, la incertidumbre climática, la vulnerabilidad ecológica y los conflictos sociales.

Esperamos que las experiencias vertidas aquí sean aprovechadas al máximo por la comunidad científica y académica nacional, así como por los tomadores de decisión, en favor de la sociedad mexicana.

Los Directores del libro

INDICE GENERAL

Prologo

Capítulo 1. Tendencias del Sistema Monzón Norteamericano en México 7

Capítulo 2. Cambio climático e incertidumbre: impacto en las variables hidrológicas de las cuencas 23

Capítulo 3. Monitoreo ambiental y necesidades hídricas de cultivos 43

Capítulo 4. Cambio climático y vulnerabilidad ecológica: impacto en el recurso suelo como sumidero de carbono 63

Capítulo 5. Impacto biológico de las sequías: caso del sitio LTER Mapimí, Durango 87

Capítulo 6. Cambio climático y vulnerabilidad ecológica: impacto en la hidrodinámica y contaminación en cuerpos de agua costeros 109

Capítulo 7. Cambio climático y conflicto social: impacto económico y ambiental de la legislación en aguas 123

Capítulo 8. Estrategias de potabilización de aguas contaminadas 147

Capítulo 9. Dimensión política y social de los problemas regionales del agua 177

Capítulo 10. El mercado de agua en la Comarca Lagunera 199

Capítulo 11. Cambio climático y conflictos sociales: geopolítica, hidro-diplomacia y guerra por el agua 227

Capítulo 12. Cambio climático y conflicto social: tensiones, cooperaciones y geopolíticas del agua 259

CAPITULO 1

Tendencias del Sistema Monzón Norteamericano en México

Carlos Lizárraga Celaya[1], Jesús Sabori[1], Julio César Rodríguez[2], Juan Arcadio Saiz Hernández[3], Christopher Watts[1]

Departamento de Física[1], Departamento de Agricultura y Ganadería[2]
Departamento de Ingeniería Civil y Minas[3]
Universidad de Sonora

Índice

Resumen
Abstract
Introducción
Objetivos
Metodología
Resultados
    Variabilidad Estacional e Interanual de la Precipitación
    Variación Estacional de Características de la Superficie
Discusión
    Efectos de Cambios en Albedo y LST sobre Radiación Neta
    Variaciones interanuales en las características del NAMS
Conclusiones
Literatura Citada

Resumen

Este trabajo presenta los cambios latitudinales en las características del Monzón de Norteamérica desde Jalisco hasta Arizona. Se utilizan datos mensuales de precipitación de 1953 a 2003 para caracterizar los cambios estacionales e interanuales en 5 Regiones Climáticas correspondientes. Se utilizan datos derivados de imágenes compuestas del sensor satelital MODIS en el período de 2000 a 2008 para mostrar las diferencias en los cambios superficiales en la región debido al Monzón. Se presenta una comparación de la variabilidad estacional de tres indicadores de la condición superficial - *Albedo*, *Índice Mejorado de Vegetación* (EVI) y *Temperatura de Superficie del Terreno* (LST) - en un transecto de cinco sitios con latitudes desde 18°N hasta 33°N: Chamela, Jal., Tamazula, Dgo., Tesopaco, Son., Rayón, Son. y Lucky Hills, Az. De esta manera, se analizó la respuesta climática de tres importantes tipos de vegetación (Matorral Desértico, Matorral Subtropical y Selva Baja Caducifolia) bajo la influencia del Monzón. En todos los sitios, se observaron incrementos en EVI y reducciones rápidas en LST al inicio de las lluvias de verano. En la parte norte, el Matorral muestra variabilidad estacional relativamente alta en LST y baja en EVI. Más al sur, en cambio, la variabilidad estacional de la Selva es baja en LST y alta en EVI. Los cambios estacionales en albedo son relativamente pequeños, con decrementos en los matorrales del norte y (curiosamente) con incrementos en las selvas del sur. Se concluye que los datos del MODIS son muy útiles en la evaluación de la respuesta espaciotemporal de la superficie al forzamiento climático.

Abstract

This work presents the latitudinal changes in the characteristics of the North American Monsoon system (NAMS) from Jalisco to Arizona. Monthly precipitation values from 1953 – 2003 are used to characterize the seasonal and inter-annual changes for 5 Climatic Regions. Data derived from composite images of the MODIS satellite sensor during the period 2000-2008 are analyzed to show changes in the surface properties due to NAMS. A comparison between the seasonal variability for 3 indicators of surface conditions – Albedo, Enhanced Vegetation Index (EVI) and Land Surface Temperature (LST) – in a transect covering 6 sites between 18°N and 33°N: Chamela, Jalisco, Tamazula, Durango, Tesopaco, Sonora, Rayon, Sonora and Lucky Hills, Arizona. In this way, the climatic response for three important vegetation types (Desert Shrub, Subtropical Shrub and Tropical Dry Forest) is examined under the influence of the NAMS. Large increases in EVI and rapid reductions in LST were observed at all sites in response to Monsoon onset at all sites. In the northern part, the shrub land sites exhibit relatively high variability in LST and lower in EVI. Further south, the seasonal variability of Tropical Dry Forest is relatively low for LST and higher for EVI. The changes in albedo (reflectance) are small at all sites, decrease slightly in the northern shrub lands but (surprisingly) increasing in the southern Dry Forests. We conclude that MODIS data is very useful for analyzing the spatial and temporal response of the surface to the climatic forcing.

Introducción

La palabra monzón se deriva de la palabra árabe *mausim* que significa estación. El término es utilizado para describir el proceso de formación de lluvias torrenciales en verano en diferentes continentes. Los monzones ocurren en zonas tropicales y subtropicales debido a la gran amplitud del ciclo anual de la temperatura terrestre (*Land Surface Temperature* o LST) comparado con la de la temperatura del mar (*Sea Surface Temperature* o SST) del océano adyacente. El aire caliente sobre el suelo tiende a elevarse, produciéndose una zona de baja presión. Esto induce vientos superficiales con mucha humedad del mar a la tierra y los procesos convectivos y orográficos producen lluvias abundantes. El ejemplo clásico es el monzón asiático donde las lluvias son especialmente copiosas. Por ejemplo, en Cherrapunji, India se han observado las intensidades máximas registradas por diferentes duraciones: 9.3 m en un mes, 16.369 m en tres meses, 22.454 m en seis meses, 26.461 m en un año y 40.768 m en 2 años! Sin embargo, este fenómeno ocurre en todos los continentes y se tratará específicamente el Sistema del Monzón de América del Norte (*North American Monsoon System* NAMS) o Monzón Mexicano en este estudio. El NAMS ha sido tema de muchas investigaciones, de las cuales se destacan dos campañas experimentales importantes: TRAVASON o *South West Area Monsoon Project* SWAMP (Reyes, *et al.*, 1994), el Experimento del Monzón de América del Norte NAME04 (Higgins y Gochis, 2007; Gochis *et al.*, 2006; Grantz *et al.*, 2007; Mestas-Nuñez *et al.*, 2007; Vivoni *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2007) y el Experimento de Humedad de Suelo SMEX04 (Cosh *et al.*, 2008; Fuqin *et al.*, 2008; Vivoni *et al.*, 2008a; Yilmaz *et al.*, 2008).

El NAMS está caracterizado por un cambio abrupto en la climatología de la precipitación en el oeste de México (100°-120° W; 17°-32° N) entre los meses de Junio y Julio, como se observa en la figura 1. Los vientos del suroeste llevan aire húmedo sobre las planicies costeras calientes y las laderas de la Sierra Madre Occidental, produciéndose lluvias abundantes por convección u orografía (Douglas *et al.*, 1993; Gochis *et al.*, 2004; 2006; 2007). La precipitación empieza en el sur y va propagándose hacia el norte, produciéndose incrementos rápidos en la vegetación (Salinas-Zavala et al., 2001). El porcentaje de la precipitación del monzón comparada con la total anual varía del 60% en sur de Arizona hasta el 90% en la costa de Jalisco. La figura 2 muestra los valores de SST en el noroeste de México en Junio y Agosto de 2004, donde se resalta el rol del Golfo de California, ya que la humedad del aire sobre el océano aumenta con SST. El agua en el Pacífico, al oeste de la Península Baja California, es fría y la humedad del aire es muy baja durante el período Junio a Agosto. Por lo tanto, los efectos del monzón son poco significativos aquí. En cambio, en la boca del Golfo SST está a casi 30°C en Junio y es la fuente de humedad para la fase inicial del monzón. En Agosto, SST se incrementa por arriba de los 30°C en todo el Golfo y representa la etapa madura del monzón en la cual se observan los cambios de la vegetación en toda la región, desde Jalisco en México hasta Nuevo México en los Estados Unidos de América.

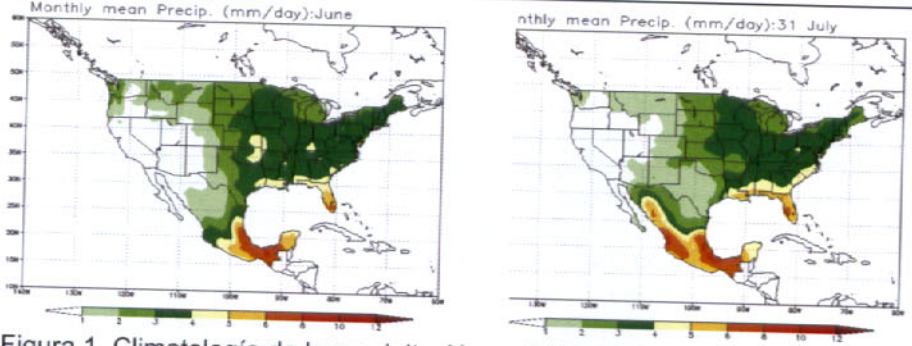


Figura 1. Climatología de la precipitación en EUA y México mostrando el inicio del Monzón Mexicano (Valores en mm por día. izquierda=junio; derecha=julio)

Objetivos

Los objetivos del presente estudio han sido:

Analizar la variabilidad estacional de la precipitación y las características de la superficie debido al NAMS.

Analizar la variabilidad interanual de la precipitación y las características de la superficie debido al NAMS.

Analizar la relación entre sequía y condición de superficie debido al NAMS

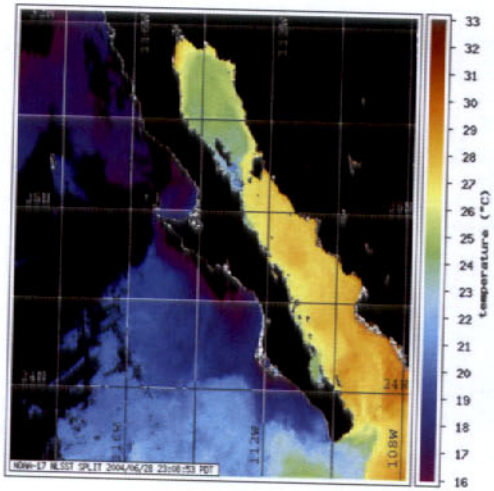


Figura 2a. SST en Junio 2004

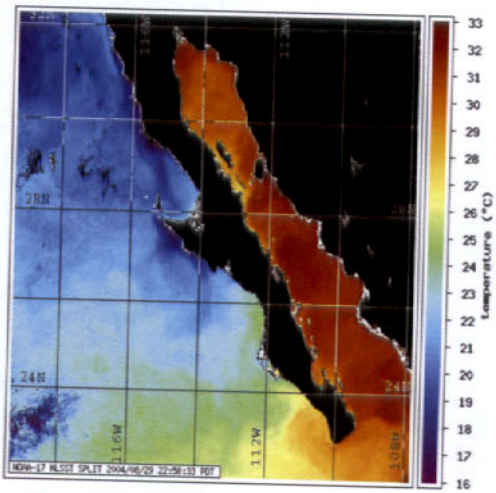


Figura 2b. SST en Agosto 2004

Metodología

En este trabajo, se estudiará el gradiente en las propiedades superficiales utilizando datos del satélite MODIS Terra obtenidos del sitio web daac.ornl.edu. Los productos que serán analizados son el Índice de Vegetación Mejorada (*Enhanced Vegetation Index*, EVI) (Huete *et al.*, 2002), el albedo (α) (definido como la relación entre la radiación solar de onda corta emitida sobre la incidente; Garatuza *et al.*, 2001) y la Temperatura de la Superficie Terrestre (*Land Surface Temperature*, LST) en cinco sitios en la región del NAM a diferentes latitudes: CH (Chamela, Jal., 19.5°N), TV (Tamazula, Dgo., 25.0°N), TP (Tesopaco, Son., 27.8°N), RY (Rayón, Son., 29.7°N), y LH (Lucky Hills, Az., 31.7°N) como se muestra en la figura 3. La vegetación es Selva Baja Caducifolia en los tres sitios al sur (CH, TV y TP), Matorral Subtropical en RY y Matorral Desértico en LH. El sitio en Chamela (ahora parte de la red LTER (Investigación Ecológica de Largo Plazo, inició sus actividades en 1971 (http://www.ibiologia.unam.mx/ebchamela/) y se han producido publicaciones ecohidrológicas relevantes a este estudio (García-Oliva *et al.*, 1995; Maass *et al.*, 1995 entre otros). Se iniciaron mediciones micrometeoro-lógicos en campo en los sitios en Sonora (RY y RT) en 2004 como parte de las actividades del Experimento de Monzón de América del Norte (Watts *et al.*, 2007; Vivoni *et al.*, 2007, 2008b, 2008c). El sitio LH está localizado en la cuenca experimental Walnut Gulch, operado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de EUA (http://www.tucson.ars.ag.gov/unit/, Scott *et al.*, 2006; USDC, 1970-1999) desde hace 50 años. El sitio TV fue seleccionado como un posible sitio para mediciones micrometeorológicas futuras en la gran extensión de Selva Baja Caducifolia entre Tesopaco y Chamela.

Figura 3. Mapa de sitios

Los datos que serán utilizados son las composiciones de imágenes sobre varios días (8 días para LST o 16 días para albedo y EVI). Esta base de datos es conveniente para el propósito del estudio, ya que la composición de varios días permiten eliminar los días nublados y obtener una

serie de datos en cada sitio con cielo relativamente despejado. El primer día de cada período es utilizado como etiqueta para cada período: DOY 1 (DOY 1 -16), DOY 17 (DOY 17-32), etcétera donde DOY es día del año (*Day Of Year*). Es importante recordar que el dato en cada período es el promedio de los valores en días despejados durante todo el período. Esto implica que no hay garantía que el dato sea representativo de todo el período. Es decir, se pierde un poco de precisión en cuanto al tiempo.

Resultados

Variabilidad Estacional e Interanual de la Precipitación

Recientemente, se definió una regionalización climatológica en México usando 18 Regiones Climáticas (Douglas y Cortez; Comunicación Personal) que se muestran en la Figura 4. Las RCs más importantes para el NAM son las siguientes: 3, 4, 5, 6 y 9. Hay importantes diferencias en la precipitación anual en estas RCs, así como su distribución temporal. Se define el período de invierno por los meses Noviembre a Abril y el de verano por los meses Mayo a Octubre y se presentan los estadísticos en la Tabla 1 y se puede llegar a las siguientes conclusiones:

La precipitación media anual es similar en las RCs 3, 5 y 6, pero del orden del doble en las RC s 4 y 9.

La contribución de la lluvia de invierno es más importante en la RC 3 con 26% del anual) que en las otras (RC 5 con 17%, RCs 4 y 6 con 13%). Es decir, la contribución es mayor en el norte y disminuye hacia el sur.

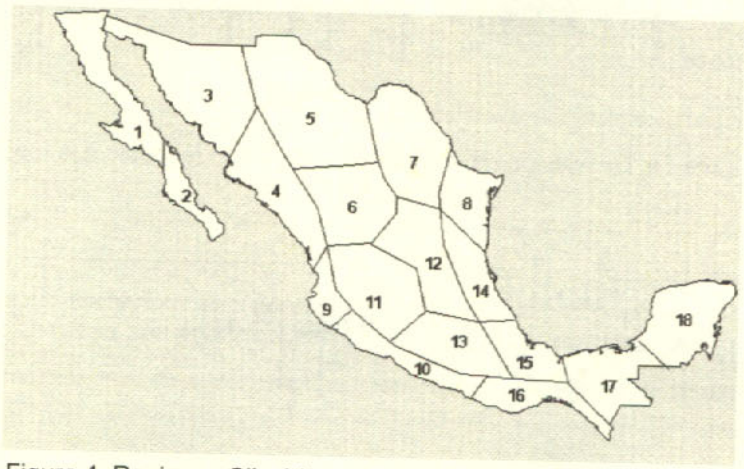


Figura 4. Regiones Climáticas en México

Tabla 1. Media de la precipitación anual, de invierno y de verano.

Región Climática	Media Anual mm	Invierno mm	Verano mm	%Verano del total anual
3	423	108	315	74 %
4	807	108	699	87 %
5	446	74	372	83 %
6	401	51	350	87 %
9	1205	89	1116	93 %

Se analizaron datos de precipitación en estas Regiones Climáticas por un período de 50 años entre 1953 y 2003 para localizar el período de sequía más importante en cada Región. Se va a ilustrar este proceso usando datos de la RC 3. Primero se calcula la diferencia entre la precipitación en cada verano menos el valor promedio (Figura 5a). Esta gráfica muestra una variación temporal considerable pero no es fácil distinguir los períodos de escasez y abundancia de la precipitación. La siguiente gráfica muestra las desviaciones acumuladas (Figura 5b) donde se puede identificar estos distintos períodos por la pendiente: las pendientes positivas corresponden a lluvias abundantes y las negativas a lluvias escasas. Claramente, la sequía más importante en estos cincuenta años fue ente 1973 y 1982 (Tabla 2). En todas las otras RCs, las sequías más importantes ocurrieron en el último período, desde mediados de los 80s hasta el último registro en 2003.

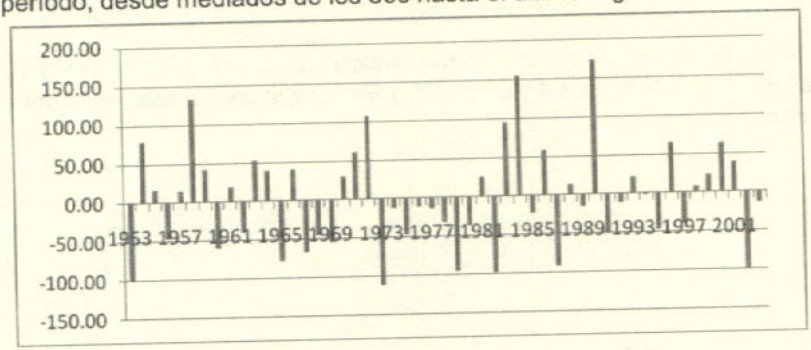


Figura 5a. Desviación de la lluvia en verano con respecto a la media

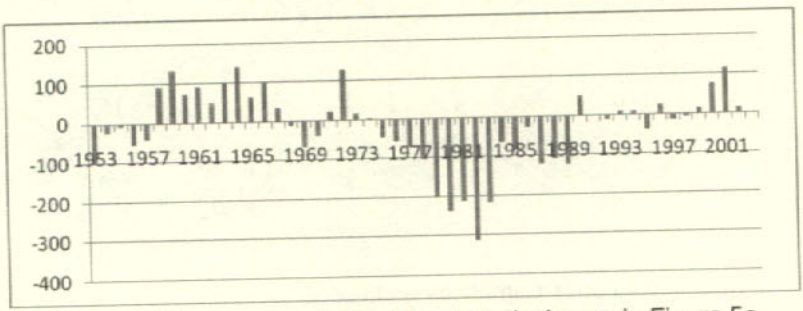


Figura 5b. Valores acumulados de las desviaciones de Figura 5a.

Tabla 2. Sequías en verano durante el período 1953-2003.

Región Climática	*Período*	*Número de años*	*Déficit Total (mm)*	*Déficit mm/año*	*% de la lluvia media anual*
3	*1973 - 1982*	*10*	*439*	*44*	*10 %*
4	*1987 - 2003*	*17*	*873*	*51*	*6 %*
5	*1992 - 2003*	*12*	*668*	*56*	*12 %*
6	*1992 - 2002*	*11*	*538*	*49*	*12 %*
9	*1986 - 2003*	*18*	*1097*	*61*	*8 %*

Variación Estacional de Características de la Superficie

Se inicia con el estudio de las variaciones estacionales durante el monzón y después se analizarán las variaciones interanuales para cada sitio. En cada período (de 8 o 16 días) se calcula el promedio del parámetro de interés para generar un valor representativo. La figura 6 muestra los resultados para EVI (6a), albedo (6b) y LST (6c). El comportamiento del EVI observado muestra que los cambios estacionales en la región permiten llegar a las siguientes conclusiones sobre los cambios estacionales de la vegetación en la región:

El crecimiento de la vegetación sigue el patrón de la precipitación, empezando en el sur (CH) a finales de mayo y llegando al norte (LH) hasta finales de julio.

El crecimiento de la vegetación es mucho mayor en las selvas del sur (con valores máximos de EVI ~0.7) que en los matorrales del norte (con valores máximos de EVI ~0.4).

La duración del ciclo vegetativo es casi 1 año en el sur, pero sólo de 5 a 7 meses en el norte.

El desarrollo estacional del albedo también muestra una diferencia marcada entre el sur y el norte. Los albedos más altos ocurren en LH y RY y son menores en las selvas del sur, indicando mayor contenido orgánico en éstos. Durante la estación de lluvia, el albedo *aumenta* para las selvas pero *disminuye* para los matorrales más abiertos. El incremento en el albedo con el crecimiento de la vegetación en las selvas es algo sorprendente y sería de interés académico investigarlo más detalladamente para identificar una explicación; sin embargo, los cambios son relativamente pequeños y no es probable que tengan consecuencias importantes.

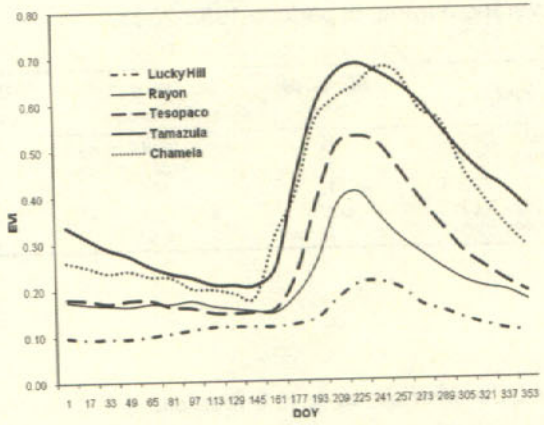


Figura 6a. Variación estacional del Índice Mejorado de Vegetación (EVI)

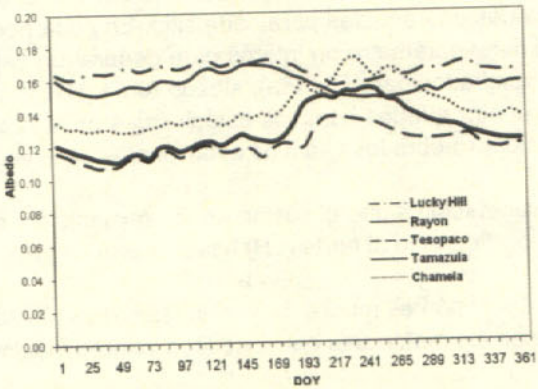


Figura 6b. Variación estacional del albedo

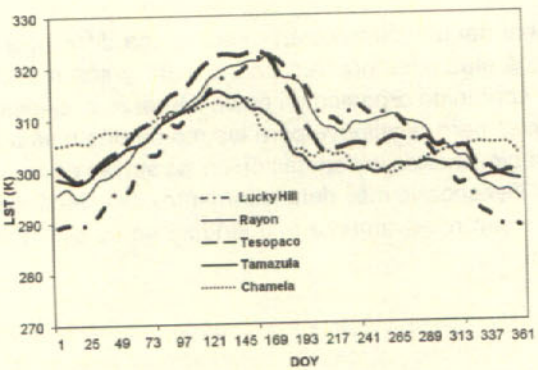


Figura 6c. Variación estacional de Temperatura de la Superficie Terrestre (LST)

La gráfica de la temperatura de la superficie terrestre en cada sitio muestra varias facetas interesantes. Se puede identificar con mayor precisión el cambio de condiciones superficiales de húmedas a secas, debido a la llegada del monzón, por el rápido descenso en LST que se observa en cada sitio, ocurriendo primero en el sur a mediados de mayo y después en el norte a mediados de junio. Durante el verano, los sitios de selva (CH y TV) tienen un comportamiento similar y los matorrales (LH y RY) tienen otro. La temperatura en el sitio intermedio (RT) tiene una temperatura máxima similar a los matorrales, pero este sitio muestra el enfriamiento más rápido de todos (18°C en 48 días). En invierno, los sitios RT y TV tienen un comportamiento muy similar.

Discusión

Para realizar un análisis cuantitativo sencillo de estos parámetros, se identificaron las fechas de inicio (DOY 145) y maduración (DOY 225) del monzón que puede utilizarse para todos los sitios. La tabla 3 tiene los valores de albedo, EVI y LST para ambas fechas en cada sitio, así como la variación estacional de estos parámetros. Los cambios en albedo van de -0.02 a +0.03, los de EVI de 0.09 a 0.47 y LST de -18°C a -10°C. Es interesante observar la simetría en el descenso de LST, con su valor máximo en el sitio central (TP) y reduciéndose tanto hacia el norte como hacia el sur. Ahora se va a analizar las implicaciones de estos resultados para los proceso de intercambio de radiación, calor y vapor entre la superficie y la atmósfera. Estos procesos están ligados en la ecuación de balance energético. Para una superficie homogénea, la ecuación puede escribirse en la siguiente forma unidimensional sencilla, sin flujo lateral (advección local):

$$R_n = R_s^{\downarrow} - R_s^{\uparrow} + R_l^{\downarrow} - R_l^{\uparrow} = G + H + ET$$

donde R_n es la radiación neta que llega a la superficie, es decir, la diferencia en las entradas y salidas de radiación de onda corta (solar) y onda larga (terrestre). Esta energía se distribuye entre el flujo de calor en el suelo (G), el flujo de calor sensible en la atmosfera (H) y la energía consumida en los procesos de evaporación y transpiración (ET). Después del inicio del monzón, las condiciones de la superficie cambian de calientes y secas (donde domina H) a húmedas y frescas (donde domina ET). En un período de 24 horas, usualmente G es muy pequeño, ya que el flujo de calor en el suelo transporta calor hacia arriba y hacia abajo en cantidades similares durante su ciclo diurno. Dado lo anterior, la energía disponible (que se reparte entre H y ET según las condiciones superficiales) es aproximadamente igual a la radiación neta. En resumen, se podría reescribir la ecuación de balance en forma aproximada:

$$R_n = (1 - \alpha) R_s^{\downarrow} + R_l^{\downarrow} - \varepsilon \sigma LST^4 \approx H + ET$$

donde se ha utilizado la definición de albedo y la ley de Stefan-Boltzmann para simplificar la expresión para Radiación Neta. Entonces, se puede apreciar que los cambios en albedo y LST presentados arriba también afectan la energía disponible en la superficie y se puede utilizar los valores encontrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de albedo, EVI y LST en cada sitio para DOY 145 (pre-monzón) y DOY 225 (post-monzón) y la diferencias entre ellos en cada sitio.

Sitio	DOY = 145		LST	DOY = 225		LST	Variación		Δ_{LST}
	α	EVI		α	EVI		Δ_{α}	Δ_{EVI}	
LH	0.17	0.12	46	0.16	0.21	36	-1.01	0.09	-10
RY	0.17	0.15	47	0.15	0.41	34	-0.02	0.26	-13
RT	0.12	0.15	49	0.14	0.53	31	0.02	0.38	-18
TV	0.13	0.21	41	0.15	0.68	27	0.02	0.47	-14
CH	0.14	0.18	40	0.17	0.64	30	0.03	0.46	-10
Medio	0.15	0.16	45	0.16	0.49	32	0.01	0.33	-13

Efectos de Cambios en Albedo y LST sobre Radiación Neta

La mayor reducción en albedo de 0.2 fue observada en Rayón, que produce un incremento R_n igual al 2% de la radiación solar. Los valores máximos de radiación solar observados en los sitios son aproximadamente 25 MJ m^{-2} por día, equivalentes a la energía requerida para evaporar una lámina de agua de 10 mm. Entonces se puede calcular que el efecto de la reducción en albedo es igual a un incremento de 0.5 MJ m^{-2} día, equivalente a la evaporación de 0.2 mm de agua. En el caso de Chamela, el incremento en el albedo de 0.03 produce un descenso de 0.75 MJ m^{-2} por día en la radiación solar incidente. Por lo tanto, se puede concluir que este cambio no es significativo.

En cuanto a los cambios en LST, primero consideramos el caso de Tesopaco con el mayor descenso observado. Utilizando los valores de LST de la Tabla 3 se obtienen estimaciones para la radiación saliente "máxima" de 609 W m^{-2} para DOY 145 y 484 W m^{-2} para DOY 225, dando una diferencia de 125 W m^{-2}. Si se supone que esta diferencia se reduce en forma lineal y se reduce a cero en el amanecer y atardecer, se obtiene la estimación de la diferencia diaria de radiación térmica saliente de 2.6 MJ m^{-2} dia^{-1}. Este cálculo sugiere que la reducción en LST tenga mayor importancia hidroecológica que el cambio de albedo. El mismo cálculo para los otros sitios da 2.0 MJ m^{-2} dia^{-1} en TV y TY, 1.5 MJ m^{-2} dia^{-1} en LH y 1.4 MJ m^{-2} dia^{-1} en Chamela. Por otra parte, sería muy útil contar con datos de LST durante la noche para hacer estimaciones más precisas de este efecto.

Variaciones interanuales en las características del NAMS

Es posible analizar las variaciones interanuales en la vegetación utilizando el promedio anual de MODIS-EVI en cada sitio durante el período de disponibilidad de 2000-2008 (Tabla 4). Se pueden identificar los años buenos (2000, 2001, 2008) con valores de EVI mayores o iguales a los promedios en cada sitio. El año con EVI más bajo fue 2005, con valores menores o iguales y los promedios en cada sitio y los años 2002 y 2003 con valores menos o iguales a los promedios en todos los sitios excepto Chamela.

Tabla 4. Promedios de EVI para cada año, período total y la desviación estándar de los EVI anuales.

Sitio	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Total	Rango	E/I
LH	0.14	0.15	0.13	0.12	0.11	0.12	0.13	0.13	0.14	0.13	0.04	2.25
RY	0.23	0.24	0.19	0.21	0.20	0.21	0.22	0.22	0.24	0.21	0.05	5.20
RT	0.30	0.28	0.25	0.23	0.27	0.24	0.26	0.26	0.30	0.27	0.07	5.43
TV	0.43	0.42	0.39	0.39	0.41	0.41	0.40	0.41	0.41	0.41	0.04	11.8
CH	0.40	0.39	0.41	0.40	0.44	0.31	0.38	0.36	0.39	0.39	0.13	3.54
Total	0.30	0.30	0.27	0.27	0.29	0.26	0.28	0.28	0.30	0.28	-	-

En general, la diferencia entre el EVI máximo y mínimo en este período (Rango de la tabla 4) es pequeño en relación a su valor medio y el cambio promedio estacional en cada sitio.

Es decir, la variabilidad estacional es más importante que la variabilidad interanual (ΔEVI de la tabla 3). La última columna de la Tabla 4 es la relación ΔEVI/Rango y muestra que este efecto se vuelve mayor en los sitios más al sur.

El sitio Chamela es la excepción a la regla con un EVI promedio muy bajo en 2005. Es probable que hubiese un evento excepcional en ese año (incendio, enfermedad, etc.) que se produjo una gran reducción en el verdor de la vegetación.

Finalmente, se hizo una comparación entre los datos de lluvia de la vegetación, para estudiar los efectos de los períodos de sequía sobre la cobertura vegetativa. Se utilizó la base de datos global mensual del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) que cubre el período 1981-2000 con una resolución espacial de 0.1 grado. Estos datos (disponibles en www.clarklabs.org/) se derivan del sensor satelital NOAA-AVHRR usando una composición de valores máximos para cada mes.

Se aplicó una media móvil de 12 meses a los datos de NDVI para suavizarlos y eliminar la fuerte señal anual. Los datos de precipitación vienen de la misma base de datos utilizados previamente, pero ahora se incluyeron todos los datos del año (verano y invierno) y se calculó el Índice Estandarizado de Precipitación (McKee *et al.*, 1993) sobre períodos de 48 meses (SPI-48) para identificar las sequías significativas y persistentes.

Se muestran los resultados para las RCs 4, 5, 6 y 9 en la Figura 7. No se presenta la gráfica para RC3 ya que la sequía más importante allí no ocurrió en ese período. Las gráficas de RC5 y RC6 muestran la mejor correlación y se puede apreciar un gran descenso en SPI y NDVI entre 1993 y 1996 en ambas figuras, durante la sequía identificada en la Tabla 2.

Los resultados para las RCs costeras (4 y 9) muestran menor variabilidad en la vegetación y poca correlación entre NDVI y SPI.

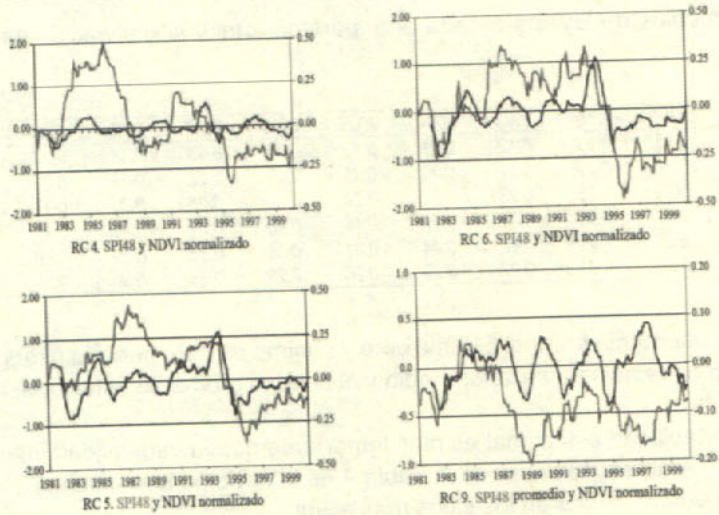


Figura 7. Comparación de SPI calculado sobre 48 meses y la media móvil de NDVI sobre 12 meses.

Conclusiones

Los incrementos en la cobertura vegetal (EVI) son importantes en toda la región, para son significativamente mayores en la vegetación selvática hacia el sur (TP, TV y CH).

Los cambios en albedo son relativamente pequeños en todos los sitios y no tendrán impacto directo en la energía disponible (radiación neta).
Las reducciones abruptas en LST al inicio de la temporada de lluvias podría tener un impacto significativo, pero habría que analizar las condiciones nocturnas para hacer una evaluación más confiable.

La variabilidad interanual en el período fue relativamente pequeña en comparación con los cambios estacionales. En el período 2000-2008 el desarrollo de la vegetación fue mejor en 2008 (2001-2) y peor en 2005 (2002-3).

Literatura Citada

Cosh, M.H., T.J. Jackson, M.S. Moran and R. Bindlish, 2008. Temporal persistence and stability of surface soil moisture in a semi-arid watershed, *Remote Sensing of Environment Volume* 112(2): 304-313.

Douglas, M.W., R.A. Maddox, K. Howard and S. Reyes, 1993. The Mexican Monsoon, *J. Climate* 105: 311-323.

Fuqin, L., W.P. Kustas, M.C. Anderson, J.H. Prueger and R.L. Scott, 2008. Effect of remote sensing

spatial resolution on interpreting tower-based flux observations, Remote Sensing of Environment Volume 112(2): 337-349

Garatuza-Payan, J., R.T. Pinker, W.J. Shuttleworth and C.J. Watts, 2001. Solar radiation and evapotranspiration in northern Mexico estimated from remotely sensed measurements of cloudiness, *Hydrological Science Journal* 46(3): 465-478.

García-Oliva, F., J.M. Maass and L. Galicia, 1995. Rainstorm analysis and rainfall erosivity of a seasonal tropical region with a strong cyclonic influence on the pacific coast of Mexico, *Journal of Applied Metereology* 34:2491-2498.

Gochis, D.J., A. Jimenez, C.J. Watts, J. Garatuza-Payán and W.J. Shuttleworth, 2004. Analysis of 2002 and 2003 Warm-Season Precipitation from the North American Monsoon Experiment Rain Gauge Network, *Monthly Weather Review* 132: 2938-2953.

Gochis, D.J. and L. Brito-Castillo, 2006. Hydroclimatology of the North American Monsoon Region in Northwest Mexico. *J. Hydrology* 316: 53-70.

Gochis, D.J., C.J. Watts, J. Garatuza-Payán and J.C. Rodriguez, 2007. Spatial and temporal patterns of precipitation intensity as observed by the NAME Event Rain Gauge Network from 2002 to 2004, *Journal of Climate* 20: 1734-1750.

Grantz, K., B. Rajagopalan, M. Clark and E. Zaragoza, 2007, Seasonal Shifts in the North American Monsoon, *Journal of Climate* 20: 1923-1935.

Higgins, W. and D.J. Gochis, 2007. A Synthesis of the Results from the North American Monsoon Experiment (NAME), *Journal of Climate* 20: 1601-1607.

Huete, A., K. Didan, T. Miura, E.P. Rodriguez, X. Gao and L.G. Ferreira, 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment* 83: 195-213.

Maass, J.M., J.M. Vose, W.T. Swank and A. Martinez-Yrizar, 1995. Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico, *Forest Ecology and Management* 74: 171-180.

McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist, 1993, The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, pp. 179–184. January 17–22, Anaheim, California.

Mestas-Nuñez, A.M., D.B. Enfield and C. Zhang, 2007, Water Vapor Fluxes over the Intra-Americas Sea: Seasonal and Interannual Variability and Associations with Rainfall, *Journal of Climate* 20:1910-1922.

Reyes, S., Douglas, M.W. and R.W. Maddox, 1994, El Monzón del suroeste de Norteamérica (TRA-VASON/SWAMP), *Atmósfera* 7(2): 117-137.

Salinas-Zavala, C.A., Douglas, A.V. y H.F. Diaz, 2001, Interannual variability of NDVI in northwest México. Associated Climatic Mechanism and Ecological Implications, *Remote Sensing of Environment* 82: 417-430.

Scott, R.L., T.E. Huxman, W.L. Cable and W.E. Emmerich, 2006, Partitioning of evapo-transpiration and its relation to carbon dioxide exchange in a Chihuahuan desert shrubland, *Hydrological Processes* 20: 3227-3243.

US Department of Commerce, CPC Daily Gridded Precipitation Analysis for US and Mexico, 1 degree by 1 degree, Monthly Climatology, 1970-1999.

Vivoni, E.R., H.A. Gutiérrez-Jurado, C.A. Aragón, L.A. Méndez-Barroso, A. Rinehart, R.L. Wyckoff, J.C. Rodríguez, C.J. Watts, J.D. Bolten, V. Lakshmi and T.J. Jackson, 2007. Variation of Hydrometeorological Conditions along a Topographic Transect in northern Mexico during the North American Monsoon, *Journal of Climate* 20:1792-1809.

Vivoni, E.R., C.J. Watts, J.C. Rodríguez, J. Garatuza-Payan, L.A. Mendez-Barroso, E.A. Yepez, J. Saiz-Hernandez, D.J. and Gochis, 2008a. Relation between Surface Flux Measurements and Hydrologic Conditions in a Subtropical Scrubland during the North American Monsoon, *CLIVAR Exchanges Newsletter* 13(2): 21-23.

Vivoni, E.R, M. Gebremichael, C.J. Watts, R. Bindlish and T.J. Jackson, 2008b. Comparison of Ground-based and Remotely-Sensed Soil Moisture Estimates over Complex Terrain during SMEX04, *Remote Sensing of Environment* 112(2):350-362.

Vivoni, E.R., H.A. Moreno, G. Mascar, J.C. Rodriguez, C.J. Watts, J. Garatuza-Payan and R.L. Scott, 2008c. Observed relation between evapotranspiration and soil moisture in the North American monsoon region, *Geophysical Research Letters* doi:10.1029/2008GL036001

Watts, C.J., R.L. Scott, J. Garatuza-Payán, J.C. Rodriguez, J.H. Prueger, W.P. Kustas and M.D. Douglas, 2007. Changes in vegetation condition and surface fluxes during NAME 2004,*Journal of Climate* 20: 1810-1820.

Yilmaz, M, E.R. Hunt Jr., L.D. Goins, S.L. Ustin, V.C. Vanderbilt and T.J. Jackson, 2008. Vegetation water content during SMEX04 from ground data and Landsat 5 Thematic Mapper imagery, *Remote Sensing of Environment* 112(2):314-325.

Zhu, C., T. Cavazos y D.P. Lettenmaier, 2007. Role of Antecedent Land Surface Conditions in Warm Season Precipitation over Northwestern Mexico, *Journal of Climate* 20: 1774-1791.

CAPITULO 2

Cambio climático e incertidumbre: impacto en las variables hidrológicas de las cuencas

Ignacio Sánchez Cohen, José Luis González Barrios, Gabriel Díaz Padilla, Miguel A. Velásquez Valle

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)

Índice

Resumen
Abstract
Introducción
- El cambio climático
- La modelación climática
- Impactos en variables hidrológicas
- Precipitación y escurrimiento
- Evaporación
- Impactos sociales

Conclusiones
Literatura citada

Resumen

Los impactos del cambio en los patrones del clima han puesto de manifiesto la vulnerabilidad de los ecosistemas. En el presente documento se presentan resultados de impacto en variables hidrológicas mediante simulaciones climáticas utilizando un modelo de circulación global (EdGCM) desarrollado por la NASA asumiendo un escenario de incrementos en CO_2 con una concentración inicial de 315.4 ppm con un incremento lineal de 0.5 ppm por año hasta el año 2000 a partir del cual se adiciono un incremento exponencial del 1% por año hasta el 2100. También se presenta un algoritmo para reducción de escala y su implementación para extender la base de datos mediante un generador climático (WXPARM) de donde se obtuvo la matriz de transición para posteriores simulaciones. Los resultados muestran el efecto del escenario de incrementos en CO_2 indicando un incremento en tasas de precipitación, evaporación y escurrimiento. Como ejemplo, la variación latitudinal de las probabilidades de incremento en precipitación ha sido analizada para la cuenca del río Nazas, esperándose mayores probabilidades de lluvia en la parte baja que en la alta. Se presenta también un mapa de impacto considerando índice de marginalidad e índice estandarizado de precipitación en las cuencas del país. De esto se ha concluido que las zonas marginales son las mayormente expuestas a las vicisitudes del clima y es a donde los mecanismos de mitigación deberían estar dirigidos.

Abstract

Climate change impact has highlighted the ecosystems vulnerability. In this document impact results on hydrological variables are presented through climate simulations using a General Circulation Model (EdGCM) developed at NASA. The simulations run assume an initial CO_2 concentration of 315 ppm with a yearly increment of 0.5 ppm through year 2000. Then an additional 1% exponential increase was added through year 2100. An algorithm for downscaling is presented and its implementation to expand the data base through a climate generator (WXPARM) from where a transition matrix was obtained for posterior use in simulation processes. Results show the effect of increasing CO_2 indicating an increment in precipitation, runoff and evaporation rates. As an example latitudinal variation of rainfall probabilities are analyzed for the Nazas River watershed expecting increased rainfall probabilities in the lower part of the watershed compared with the upper portion. A map of impact is presented considering the marginality index and the standardized precipitation index over the country's watersheds. It has been concluded that marginal areas are more exposed to weather extremes and are the places where mitigation mechanisms should be directed.

Introducción

El cambio en patrones de clima ha sido el paradigma de diversas investigaciones en el mundo sobre todo a partir de la época de la expansión industrial en la que se han detectado incrementos importantes de emisiones de gases a la atmósfera con repercusiones en la temperatura que a su vez cataliza otras variables atmosféricas (Acot, 2005). Así, en la época previa a la revolución industrial la población del planeta y los patrones de consumo tenían poco efecto en la atmósfera. De hecho, muestras en bloques de hielo de la Zona Antártica que datan de 1700 años A.C. muestran concentraciones consistentes de CO_2 en 260 ppm y de 700 ppb de metano. A partir de la revolución industrial, el crecimiento poblacional y su expansión en el planeta así como el efecto de la tecnología han tenido marcado efecto en la concentración actual de estos gases. También, la deforestación, la quema de residuos orgánicos y la combustión de combustibles basados en carbono han contribuido enormemente a la alteración de la atmósfera (Naciones Unidas, 1998)

Acorde a diversos pronósticos, para el año 2030 existirá en el mundo una concentración de CO_2 de 460 a 500 ppm. (Figura 1) De hecho, la meta del protocolo de Kyoto no es la reducción en la emisión de gases *per se* sino retardar en 20 años el tiempo en que estos son emitidos a la atmósfera (Bruce, 1999). Lo que queda claro es que esas cantidades de CO_2 en la atmósfera están teniendo impactos en la calidad del aire, la temperatura global y la cantidad y tipo de la precipitación (Figura 2) con impactos negativos en el bienestar de la humanidad y pone en riesgo la soberanía alimentaria de las naciones; en México se esperan incrementos de hasta 2.0°C para los próximos 30 años en algunas regiones del país.

Según las previsiones, los rendimientos agrícolas disminuirán en la mayor parte de las regiones tropicales y subtropicales, pero también en las zonas templadas si los incrementos en temperatura son considerables. Investigaciones recientes apuntan que por cada grado centígrado de incremento en temperatura, el rendimiento del maíz, arroz y trigo decrecerá en 10% (Brown, 2009); es de notarse el impacto que esto tendría en los países cuya dieta se fundamenta en esos tres cereales. Es de esperarse también la emigración de enfermedades y su intensificación al afectar a poblaciones desnutridas y carentes de reservas de agua. También, la categoría de refugiados ambientales tiende a incrementar por causa de los eventos extremos sean sequías prolongadas o inundaciones. Esta situación tiene impactos tanto en el sitio fuente de emigrantes como en aquel receptor. Grandes urbes están ya padeciendo escases de agua motivada por las variaciones en precipitación pluvial.

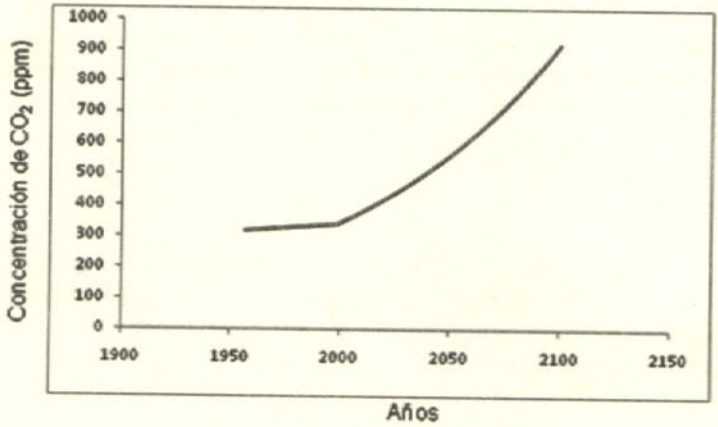


Figura 1: Variación proyectada en las concentraciones de CO_2 acorde al IPCC (2001)

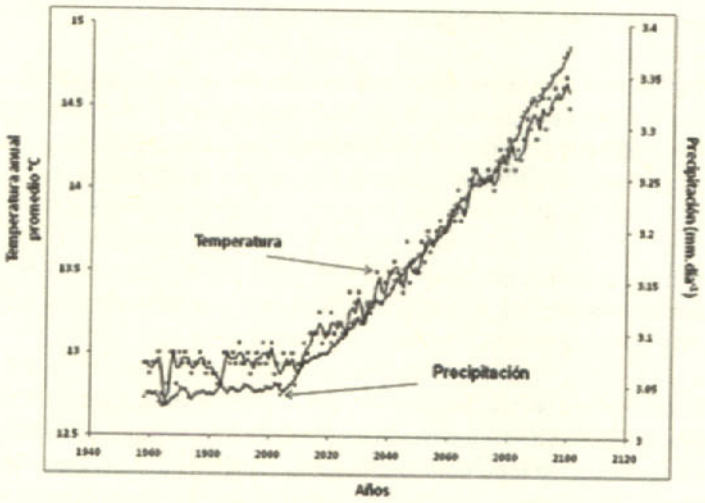


Figura 2: Variación y relación entre la precipitación y la temperatura producto del incremento en CO_2. (Obtenida por los autores usando el modelo de circulación global EdGCM considerando una concentración inicial de CO_2 de 315.4 ppm (año 1958) con un incremento lineal de 0.5 ppm por año hasta el año 2000 a partir del cual se adiciono un incremento exponencial del 1% por año hasta el 2100 provocando que se duplique la cantidad inicial de CO_2 en el año 2062).

El impacto local de las anteriores alteraciones es el foco de atención para el diseño de los procesos de mitigación en el mundo y constituyen asunto primordial en las agendas internacionales dado que, en su máxima expresión, este impacto ha tipificado a una nueva categoría de refugiados: Los Refugiados Ambientales (WWF, 2009).
El objetivo del presente capítulo es presentar un análisis de escenarios climáticos probables de impacto en México considerando variables físicas y sociales con énfasis en cuencas hidrológicas.

El cambio climático

El término "calentamiento global" se refiere al hecho de que en la medida en que mas CO_2 y otros gases de efecto invernadero, sean añadidos a la atmósfera, la temperatura de la tierra se incrementa (GCRIO, 2007). Sin embargo, la temperatura promedio de la tierra sería 34°C mas fría que su temperatura actual si no fuera por el calor que atrapan estos gases impidiendo el enfriamiento global (IPCC, 2001). Con fundamento en lo anterior, Las Naciones Unidas (ONU, 1992) ha definido al cambio climático como:

"un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables."

Los principales gases que causan esto son el dióxido de carbono, oxido nitroso, y vapor de agua. De hecho, el vapor de agua es el gas más abundante e importante de este efecto ya que más allá de su efecto como gas de invernadero, las nubes que se forman de vapor de agua atmosférico afectan el balance de energía en la tierra sea reflejando radiación (efecto de enfriamiento), ó atrapando radiación infrarroja (efecto de calentamiento). Durante el siglo XX la temperatura subió en promedio 0.6 °C con desviaciones de ± 0.2°C, es decir, esos incrementos han sido desde 0.4 a 0.8°C. El problema del calentamiento global no son los gases *per se*, sino la rapidez con que son lanzados a la atmósfera sin dar tiempo a los seres vivos a adecuarse en consecuencia.

Cuando los efectos de estos cambios anómalos en patrones del clima empezaron a ser sentidos en naciones industrializadas, la mayor parte de los países se adhirieron a un tratado internacional –la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático– en el que se analizó la necesidad de reducir las emisiones de gases a la atmósfera siendo que las economías de las naciones más poderosas económicamente, cifran su desarrollo en gran medida en el uso de combustibles fósiles. Así, la reducción del calentamiento atmosférico y la adopción de medidas para hacer frente a los cambios en temperatura fueron desde un inicio el paradigma de esta convención. En 1997, los gobiernos acordaron incorporar una adición al tratado, conocida con el nombre de Protocolo de Kyoto, que cuenta con medidas más enérgicas (y jurídicamente vinculantes). El tratado entró en vigor en Febrero del 2005 (por haberse alcanzado entre los firmantes el 55% de las emisiones globales).

Modelación climática

La herramienta principal para hacer proyecciones sobre el cambio climático en el futuro son los modelos físicos complejos. Para analizar la gama completa de escenarios se hace necesario complementarlos con modelos físicos simples, calibrados para ofrecer una respuesta equivalente a los complejos. Los modelos climáticos son una herramienta esencial para entender el clima actual y su variabilidad. El clima es quizá el factor natural más difícil de modelar debido a las enormes variaciones en espacio y tiempo de las variables que lo definen. Estas fluctuaciones resultan de las interacciones entre el océano, la atmósfera, la tierra y la capa cubierta de hielo de ésta, así como de los cambios en el balance de energía que resultan de las erupciones volcánicas y la variación en la intensidad de los rayos solares (Prager y Earle, 2001).

Los modelos climáticos están constituidos por sistemas de ecuaciones diferenciales derivadas de las leyes básicas de la física, el movimiento de los fluidos y de la química las cuales son resueltas en súper computadoras con capacidad de procesamiento y almacenamiento mucho más allá de una computadora personal (Sánchez, *et al* 2009). Estos modelos dividen a la atmósfera en capas y a la superficie en pixeles que oscilan en resoluciones acorde al objetivo perseguido. A resoluciones muy precisas se incrementa el requerimiento de capacidad computacional.

Sin pérdida de generalidad, el impacto que estos modelos predicen en variables hidrológicas es que habrá un incremento en precipitación con el consecuente impacto en la producción de escurrimientos. Para el tratado de esta variable, el modelo de circulación general EdGCM (Hansen *et al* 1983), utiliza un modelo de dos capas en la que la primera responde de manera inmediata a la evaporación y precipitación y la segunda capa actúa como reservorio. En el modelo, la tasa de cambio de la humedad en la capa superior es cuantificada como:

$$\frac{dW_1}{dt} = \frac{P - E - Q}{f_1} + \frac{W_2 - W_1}{\tau} \qquad (1)$$

Donde la humedad de la capa *i*, W_i, es el cociente de la humedad disponible y aquella a capacidad de campo. *P*, *E* y Q son respectivamente las tasas de precipitación pluvial, evaporación, y escurrimiento. es el tiempo para difusión de humedad entre capas. La humedad de la capa inferior está dada por:

$$\frac{dW_2}{dt} = \frac{f_1}{f_2}\frac{W_{1-} W_2}{\tau} \qquad (2)$$

La evaporación es calculada como:

$$E = \beta E_p \qquad (3)$$

Donde E_p es la evaporación potencial de una superficie húmeda y β es un factor de eficiencia el cual depende de la humedad del suelo, tipo de éste y el punto de marchitéz permanente; así:

$$\beta = W_1 \tag{4}$$

La capacidad de campo (CC) depende del tipo de suelo y vegetación principalmente. En el modelo EdGCM la humedad disponible en los desiertos se considera de ≈ 20 cm y la CC de 5 a 10% del volumen de suelo. En aéreas con vegetación, estos valores son del orden de 50 a 10 cm y de 20 a 25% respectivamente. El modelo considera que la capa superior es de 10 cm para que coincida con los cálculos de temperatura; También para las zonas desérticas se considera que f_1= 6 mm, f_2 = 3 cm; para bosques f_1 = 6cm, f_2 = 30 cm; para bosques tropicales f_1 = 6 cm y f_2 = 30 cm y para otras áreas f_1 = 2.4 cm y f_2 = 12 cm. es = 2 acorde a la relación funcional $\approx d^2/D$ en donde la profundidad d = 10 cm y la difusividad D varía desde 1 hasta 10^4 cm.día^{-1}. En el modelo Q es calculado como: (Hansen *et al.* 1983)

$$Q = W_1 P \tag{5}$$

De la anterior ecuación nótese que cuando el suelo está saturado, W_1=1 y $Q = P$. Las variables independientes para el cálculo de "Q" aparecen en los mapas de la Figura 3 siendo: Longitud de la rugosidad del terreno, cubierta vegetal, capacidad de campo y topografía.

En la Figura 3, los blancos son = 0. La longitud de la rugosidad (A) esta expresada en cm. Para cubierta vegetal, CV, (B), los valores marcados con 0 significan CV de entre 0 y 5%, "I" significa 5 – 15%, "A" es 95 – 100% y "X" es exactamente 100%. La capacidad de campo (C) esta expresada en mm. Para topografía (D), "0" significan alturas de entre 0 y 5 m, "I" de 50 – 150 m y "+" es mas de 3550 m. Para todos los mapas, los valores a la izquierda de éstos son promedios longitudinales ponderados por área y la leyenda se indica al pie de cada mapa.

Acorde a la nomenclatura descrita, en la Figura 3 los recuadros circunscriben a México y las celdas señaladas se pueden leer como: Longitud de la rugosidad H =160, F=140, 70, 90 y 90 cm; 50, 100, 100, 100 y 80% de cubierta vegetal promedio por año; capacidad de campo: 0, 160, 200, 440 y 400 mm; el mismo vector pero con la variable topografía se puede leer como: 500, 600 700, 200 y 200 metros de altura.

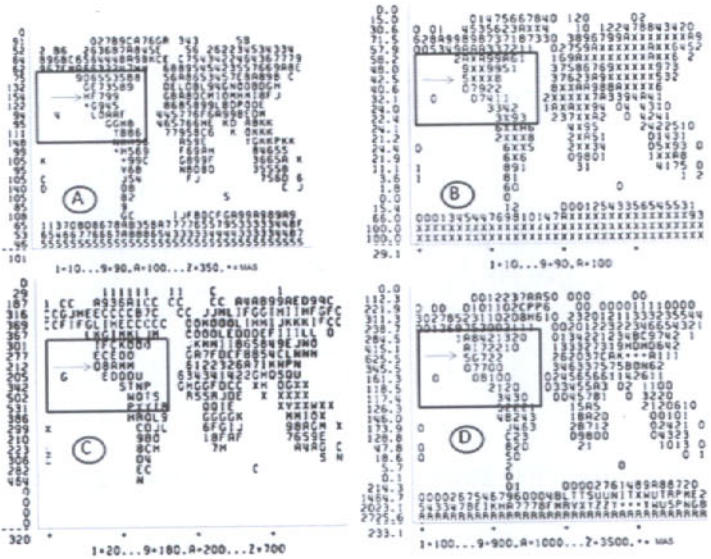


Figura 3: Distribución espacial de las condiciones iniciales que considera el modelo EdGCM de Longitud de la rugosidad del terreno (A), cubierta vegetal (B), capacidad de campo (C) y topografía (D) para el cálculo de variables hidrológicas en una resolución de 8 x10 grados cartesianos.

Impactos en variables hidrológicas
Precipitación y escurrimiento

Para ejemplificar el impacto del cambio climático en el escurrimiento, se diseñaron dos escenarios a saber:
Escenario 1 (CG): En el escenario CG se consideró una concentración inicial de CO_2 = 315.4 ppm (condición de 1958), con un incremento lineal de 0.5 ppm por año hasta el año 2000 a partir del cual se adiciono un incremento exponencial del 1% por año hasta el 2100.
Escenario 2 (SCG): En el escenario SCG se mantuvo constante la concentración de CO_2 en 315.4 ppm (concentración que existía en 1958) para el periodo de simulación (1958 – 2070).
Los resultados de esta simulación, se muestran en la Figura 4 en la que se aprecia un incremento global en las tasas de precipitación y de escurrimiento expresadas en $mm.día^{-1}$ para el escenario CG. El escenario SCG muestra la tendencia que hubiesen tenido estas dos variables si las concentraciones de CO_2 se hubieran mantenido constantes desde el 1958. En esta figura es de notarse también las fluctuaciones de estas variables en el tiempo lo que es un indicador adicional de incertidumbre. Las aparentes pequeñas tasas de cambio en ambas variables adquieren relevancia en zonas áridas y semiáridas.

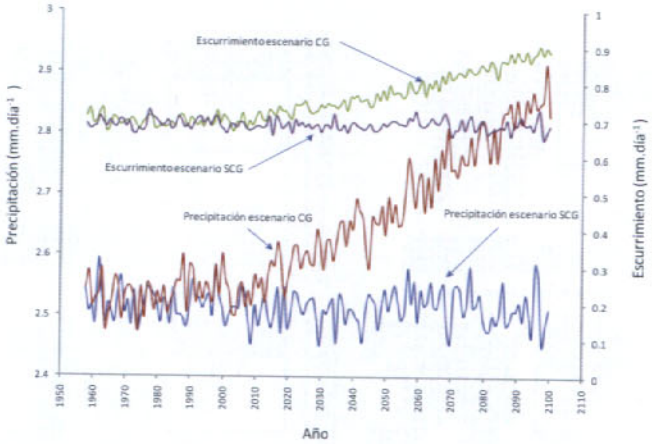


Figura 4: Impacto del calentamiento global en el escurrimiento. (Obtenida por los autores con el modelo EdGCM)

En la Figura 5 se pueden observar las relaciones entre precipitación y escurrimiento en los dos escenarios ensayados. Bajo condiciones de cambio climático el rango de respuesta del escurrimiento, a un incremento en precipitación, es mayor que aquel bajo condiciones estables de CO_2; también la respuesta es mayor (indicado por la pendiente de la recta); esto debido al impacto en la cubierta vegetal. El escurrimiento es altamente sensible a la cubierta vegetal y a la intensidad de precipitación. Manteniendo constantes las demás variables, ante un suelo parcialmente desnudo, un ligero incremento en intensidades de precipitación repercute en tasas de escurrimiento considerables (Sánchez, *et al* 2003, Hawkins, 1985, Hawkins *et al* 1975, Hawkins, 1990).

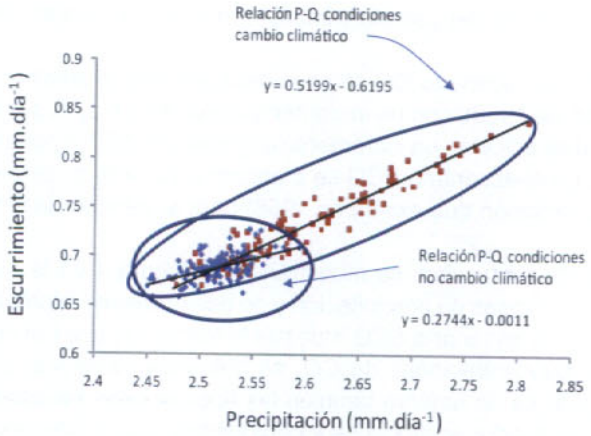


Figura 5: Relación precipitación – escurrimiento para los escenarios ensayados.

La distribución latitudinal del escurrimiento y la precipitación bajo los escenarios ensayados se aprecian en la Figura 6 en donde se puede notar que de manera global las mayores tasas de escurrimiento ocurrirán en el hemisferio sur hacia los -60° y las mayores tasas de precipitación ocurrirán entre los -30° Latitud sur y 30° Latitud norte con el máximo en el ecuador.

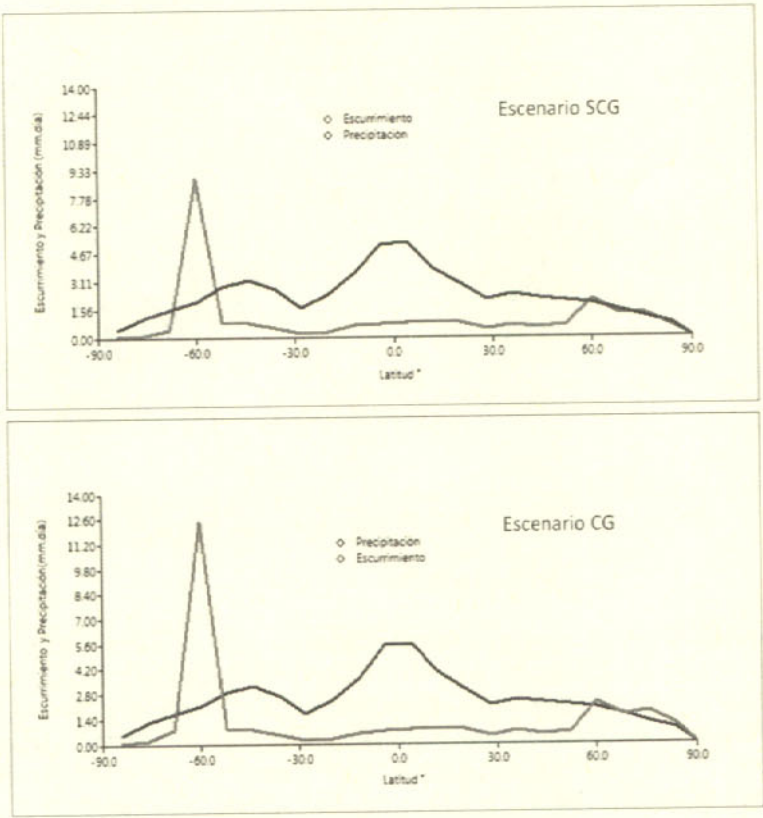


Figura 6: variación latitudinal de las variables hidrológicas precipitación y escurrimiento bajo los escenarios SG y CG.

Utilizando cinco modelos del IPCC, la Figura 7 muestra las probabilidades de que ocurran los incrementos de precipitación en un gradiente longitudinal para la porción comprendida entre los paralelos 25° y 26° donde se ubica la parte alta de la cuenca del río Nazas en el estado mexicano de Durango. Acorde a la información que señala la Figura 7, la probabilidad de incremento en precipitación es mayor en la parte baja del gradiente (≈75%) y decrece con la altitud hasta alcanzar un promedio de 60%. La diferencia local pudiera ser que el bosque tiene capacidad de absorber y fijar Carbono manteniendo volúmenes más "bajos" de CO_2 que en la parte baja en donde existiría incremento de energía de onda larga

aumentando la temperatura de esa latitud con mayor capacidad de absorber humedad por efecto del aire seco y caliente.

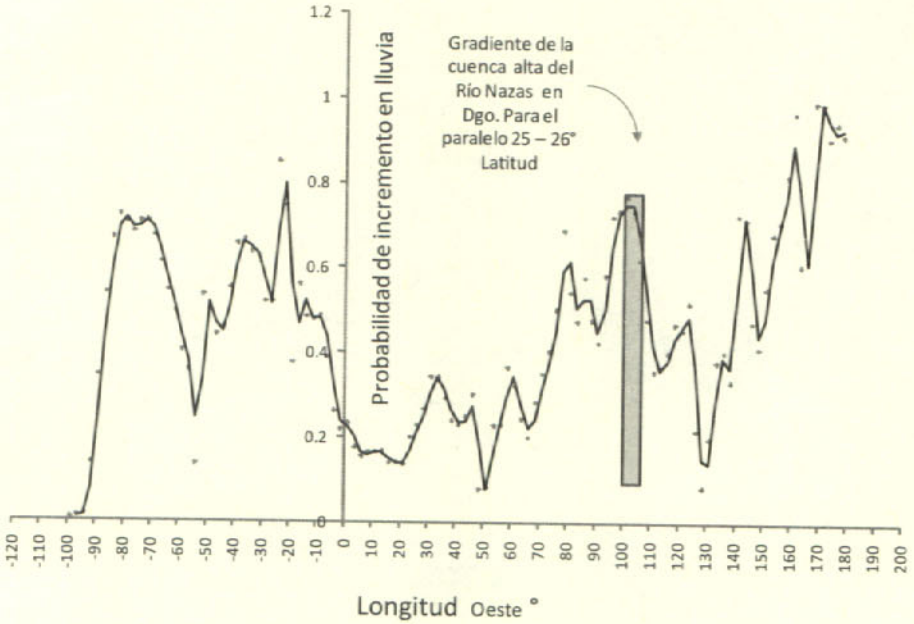


Figura 7: Probabilidades de incremento en precipitación al año 2050 utilizando el promedio de 5 modelos de circulación global del IPCC (CCSM-30, GFDLCM-20, GFDLCM -21, GIS ER, UKHADCM3). Los modelos fueron desarrollados por la NASA, NOAA, NOAA, NASA y el Centro Hadley respectivamente. El rectángulo de la grafica muestra el gradiente entre los meridianos 102° y 106 ° de longitud oeste y los paralelos 25° y 26° de latitud norte, donde se ubica la cuenca alta del río Nazas en el estado de Durango.

A nivel local, la ocurrencia de precipitación diaria es un ejemplo meteorológico simple de un evento aleatorio binario (ocurre o no ocurre, lo que se considera dos estados de esa variable), por lo que una secuencia de estos eventos constituye una serie de tiempo de esta variable. Un modelo estocástico muy comúnmente usado para el análisis de información de este tipo, es el de las Cadenas de Markov de primer orden para dos estados de la naturaleza. Estas cadenas tienen la propiedad de que la probabilidad de transición que gobierna cada observación en la serie de tiempo, depende solo del valor del dato anterior (Wilks 1985, Banks 1998, Haan, 1982).

Con fines de analizar la manera en que estas probabilidades condicionales han variado a través del tiempo bajo las condiciones del calentamiento global, se utilizó un modelo de

reducción de escala (SDM) en el que en las técnicas estadísticas de reducción de escala y las variables del clima regional o local (predictandos) se obtienen generando un modelo estadístico que las relaciona con las variables de gran escala del *GCM* (predictores) (Flato *et al*, 2000). Dicha relación involucra relaciones entre observaciones de gran escala y de superficie, teniendo como hipótesis fundamental que las relaciones construidas con el clima actual se mantienen aun bajo cambio climático (Rivas, 2007).

Utilizando información de una estación climatológica en Cuencamé, Durango, para el uso de este modelo, se obtuvo la matriz de ocurrencia de precipitación pluvial para diferentes años: 2020, 2050 y 2080. Con esta información se usó el modelo WXPARM (http://www.hydrology.uni-kiel.de/~schorsch/epic/html/doku/appendixes/wxparm.html) para generar 50 años de precipitación y obtener la matriz de transición de lluvia bajo condiciones de cambio climático de la cual, en la Figura 8 se señala solo la probabilidad condicional de que en un determinado día llueva dado que en el día anterior llovió (PWD).

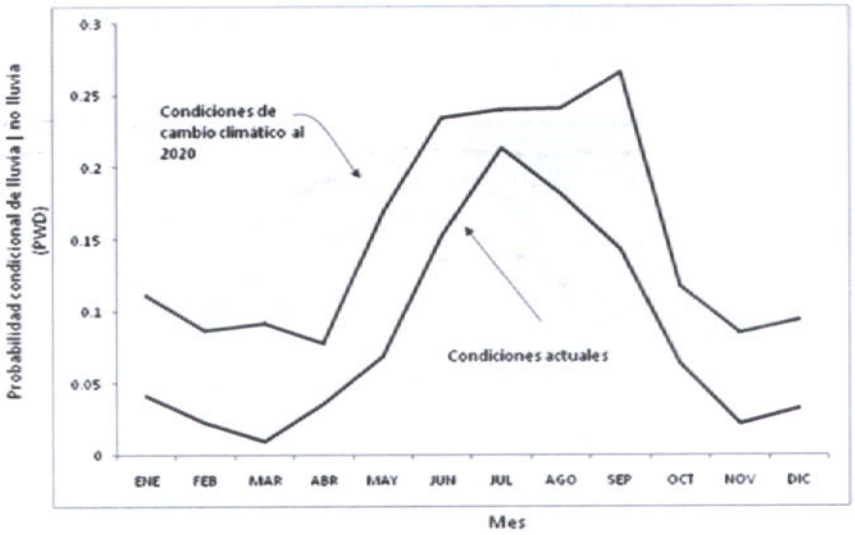


Figura 8: Probabilidad condicional de que en un determinado día ocurra lluvia dado que el día anterior no ocurrió (PWD) para condiciones de cambio climático al año 2020 y para las condiciones actuales, en la estación Cuencamé Durango ubicada en 25°52'0" Latitud norte y 103°41'47" longitud oeste, con 1600 m de altura sobre el nivel medio del mar.

La información de PWD es usada para la generación estocástica de eventos de precipitación pluvia y constituye la base para la toma de decisiones en zonas con incertidumbre climática. En un modelo de balance diario, la información sirve para la generación de datos sintéticos de precipitación misma que es distribuida en los procesos de evapotranspiración, infiltración y escurrimiento (Sánchez, 2005). En la Figura 8 se puede apreciar que bajo condiciones de cambio climático al año 2020 las probabilidades condicionales de lluvia

dado no lluvia (PW|D) se incrementan indicando con ello el incremento en precipitación como se ha indicado en la Figura 4. Otro aspecto importante es que las mayores probabilidades de lluvia en un día cualquiera dado que el día anterior fue seco, bajo condiciones de cambio climático, se esperarían en el mes de septiembre y no en julio como normalmente ocurre en la región de estudio.

Evaporación

Bajo el mismo escenario descrito para precipitación, la evaporación sigue la misma tendencia que la precipitación para los dos escenarios ensayados, notándose mayores tasas de esta variable en los océanos de ambos hemisferios a excepción del ecuador en donde se aprecia mayor evaporación bajo condiciones de cambio global en la parte continental. En los océanos la evaporación ocurre a tasa potencial eliminándose el factor β de la ecuación 3 y la variable depende de variables atmosféricas. En los continentes, cuando el contenido de humedad del suelo está por debajo de algún factor crítico (capacidad de campo) la evaporación depende de las propiedades físicas del suelo consideradas en β.

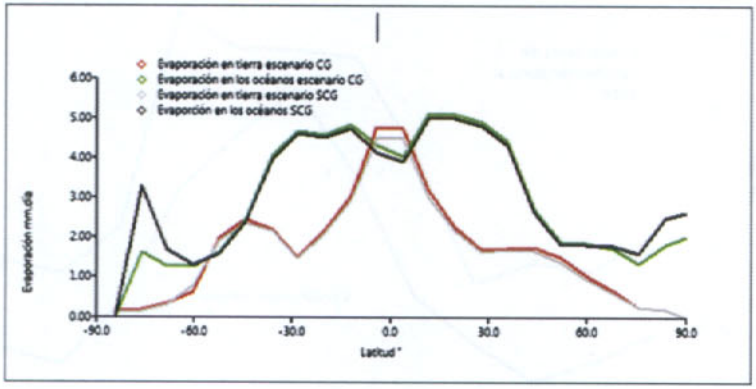


Figura 9: Distribución latitudinal de la evaporación en tierra y océanos bajo los dos escenarios ensayados.

Para el cálculo de evaporación, los valores de capacidad de campo, de la humedad disponible en función de los tipos de suelo y la amplitud de los estratos considerados en el modelo, han sido definidos con anterioridad.

Impactos sociales

Uno de los impactos más notables del cambio en los patrones del clima es el desplazamiento de gente afectando a la población más vulnerable en virtud de que este sector de la sociedad es el que está más expuesto a los desastres debido a la deforestación, desplazamiento de masas de tierra, pérdida de productividad del suelo por erosión, y con un componente de falta de apoyos gubernamentales para la producción rural sustentable incluyendo los servicios

ambientales (Oswald, 2008a). Por otro lado, esta parte de la población es la mayormente expuesta a enfermedades y plagas (Acuña *et al.*, 2002). La afectación de género es también asunto preocupante sobretodo en países cuya marginalidad es superlativa (Oswald, 2008b)

La falta de algoritmos robustos para sustentar la hipótesis de que el cambio en patrones climáticos impulsa el proceso de emigración, ha conducido a la falsa impresión de correlaciones casuales entre eventos extremos observados y el desplazamiento de gente. Las ciencias que se ocupan del estudio de estas correlaciones no han podido distinguir o disgregar las proporciones que tiene cada variable en el proceso de emigración (Sánchez *et al* 2009). Sin embargo, son cada vez más los científicos que sustentan la hipótesis de los refugiados ambientales por causas climáticas como ha quedado de manifiesto durante el V Foro Mundial del Agua de Estambul, Turquía (2009). En México el clima ha venido funcionando como catalizador de la emigración cuyas principales causas han sido los lazos familiares, los aspectos económicos, la salud y el empleo entre otras (Sánchez *et al,* 2008a).

La Figura 10 presenta un ensamble del rezago social, el índice estandarizado de precipitación, SPI (una descripción detallada del SPI y la manera de cuantificarlo puede consultarse en Sánchez *et al,* 2008b), y las cuencas hidrológicas en México. En esta Figura se puede observar que en una porción de la parte alta de la sierra madre occidental convergen altos índices de rezago social y condiciones severas de sequía (SPI ≤ -0.99); el mismo caso para algunas cuencas en los estados de Chihuahua, Durango, Jalisco Veracruz y Chiapas. Estos y otros estados figuran entre las entidades mexicanas que mas emigración rural tienen hacia los Estados Unidos de Norte América (Sánchez *et al,* 2008a).

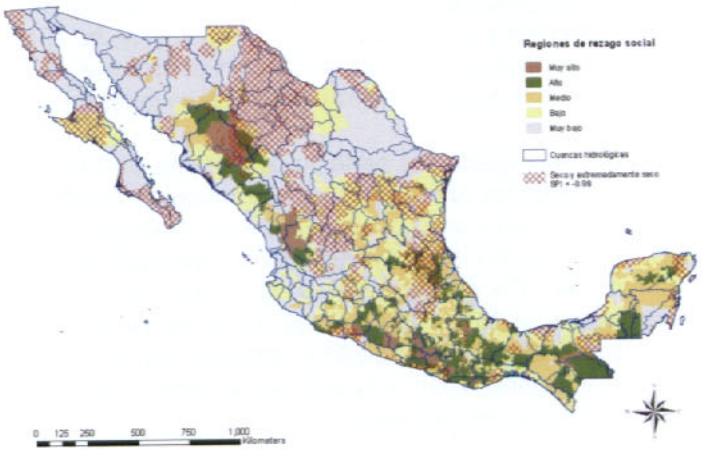


Figura 10: Rezago social, condiciones de sequía (SPI ≤ -0.99) y cuencas hidrológicas. Mapa elaborado con información de CONAPO (2002)

Conclusiones

Los impactos del cambio climático global son innegables y se han hecho evidentes en la respuesta de diversas variables hidrológicas y sociales a las alteraciones climáticas. En las primeras, es de esperarse afectaciones en las tasas de precipitación y el consecuente escurrimiento aunque éste está íntimamente ligado a la cubierta vegetal, tipo de suelo y fisiografía. Se ha logrado detectar que la respuesta del escurrimiento a eventos de precipitación es mayor bajo condiciones de cambio climático por impacto de la baja cobertura vegetal y las mayores tasas de precipitación diaria. Acorde al escenario ensayado con el modelo EdGCM, se esperarían en los próximos 10 años un incremento en el escurrimiento de entre 4 y 6% a nivel global y un incremento en la precipitación de 2 a 4% en base diaria. Las diferencias de los valores entre tasa de lluvia diaria mínima y máxima son mayores bajo condiciones de cambio climático que en condiciones estables de CO_2 indicando mayor incertidumbre (variación) por efecto del incremento en la atmósfera de este gas. También, acorde a los modelos utilizados, existiría un retraso en las probabilidades de ocurrencia de lluvias pasando del mes de julio al mes de septiembre. Esto puede tener un impacto en las fechas de siembra de cultivos anuales en la región de estudio (Cuencamé) y pudiera modificar todo el esquema productivo de los productores de la región. De hecho, un retraso en el temporal de verano implicaría un alto riesgo de afectación de los cultivos por heladas tempranas.

En el aspecto social, destaca la vulnerabilidad de las zonas marginales a los cambios en patrones climáticos, así, en las sierras es en donde convergen altos grados de marginalidad y eventos extremos de sequias mismas que, al presentarse de manera reiterada junto con otros eventos extremos como heladas, impulsan la emigración hacia regiones climáticamente más estables. De manera empírica en varios estados del país se puede constatar la presencia de indígenas en las ciudades que han abandonado sus lugares de origen motivados por diferentes causas dentro de las cuales, se ha añadido el clima. También, en el sur sureste de México las personas han emigrado hacia el centro del país, tras los embates de eventos climáticos extremos como los huracanes de años recientes.

El diseño de mecanismos de mitigación es parte preponderante en el tratado del cambio climático; otro aspecto que adquiere relevancia son las estrategias de adaptación. En este sentido, el uso racional de los recursos naturales debe ser el paradigma de los planes gubernamentales. El incremento en las eficiencias de uso del agua es crucial ya que la agricultura consume más del 70% de las reservas. En México los distritos de riego no alcanzan eficiencias mayores al 40%. Por otro lado, el dispendio de agua en usos no esenciales en las ciudades debe ser controlado y normado. La participación social es indispensable para que los planes vayan más allá de ser intenciones de gobierno y se lleven a cabo mas por convicción que por leyes.

Literatura citada

Acot, P. 2005. Historia del clima. Desde el big bang a las catastrophes climáticas. Editorial El Ateneo, Buenos Aires Argentina. 268 pp

Acuña, S.R., D.W. Stahle, M.K. Cleveland and M.D. Therrel. 2002. Mega drought and Mega death in 16th century Mexico. Emerging Infectious Diseases. Vol. 8, No. 4 Pp 360 – 362.

Banks, J. 1998. Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice. Enginnering and Management Press. 847 pp.

Brown, L.R. 2009. Could Food Shortages Bring Down Civilization? Scientific American. 2009: 38 - 45

Bruce, J. 1999. Global Climate Change. In: Climate Change and Watershed Management. Proceedings of a Symposyum. Ontario, Canada. 25 pp.

CONAPO. 2002. Índice de intensidad migratoria México Estados Unidos. Consejo Nacional de Población. México D.F.

Flato, G. M., G. J. Boer, W. G. Lee, N. A MacFarlane, D. Rmasdem, M.C. Reader and A. J. Weaver, 2000. The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis Global Coupled Model and its Climate. Climatic Dynamics 16: 451-467.

GCRIO Global Change Information Office. 2007. Archives of the Global Climate Change Digest. Vol 12 No. 6.

Haan, C. T. 1982. Statistical Methods in Hydrology. The Iowa State University Press. 378 pp.

Hansen, J., Russell, G., D. Rind, P. Stone, A. Lacis, S. Lebedeff, R. Ruedy and L. Travis. 1983. Efficient Three- Dimensional Global Models for Climate Studies: Models I and II. Monthly Weather Review, Vol. 111, No.4. 609 – 661.

Hawkins, R. H. 1985. The importance of accurate curve numbers in the estimation of storm Runoff. Water resources bulletin Vo. 2, Num 5. American Water Resources Association. Pp 887 – 891.

Hawkins, R. H., Hjelmfelt A. I. and Zevenbergen A. W. 1975. Ruoff probability storm depth and curve numbers. Journal of irrigation and drainage engineering. Vol. 3 num 5. Pp 330- 340.

Hawkins, R.H. 1990. Asymtotic determination of curve numbers from rainfall runoff data. Proceedings of IR conference watershed management. Durango. Pp 67 – 76.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. Climate Change 2001. Synthesis Report.

Naciones Unidas. 1998. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. FCCC/INFORMAL/83*GE.05-61702 (S) 130605 130605. 23 pp.

ONU, Organización de Naciones Unidas, 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. FCCC/INFORMAL/84* GE.05-62301 (S) 220705. 220705 Artículo 1. New York, USA 23 pp.

Oswald S. U. 2008a. Key elements of environmental induced migration: A Mesoamerican ans Mexican Vision. UNU.EHS. 16 pp.

Oswald, U. 2008b. *Gender and Disasters. Human, gender and Environmental Security: A HUGE Challenge*, UNU-EHS Source, no 8., Bonn.

Prager E. J. y Earle, S. A. 2001. Los Océanos. Un Llamado a la Conciencia Mundial. McGraw Hill. 382 pp.

Rivas Pacheco T. 2007. Escenarios de cambio climático para 2020 y 2085 en la planicie costera, entre los departamentos de La Paz, San Vicente y Usulután, El Salvador. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección de Meteorología de SNET. El Salvador.

Sánchez Cohen I., M. Velásquez Valle, R. Jasso Ibarra y J. L. Barrios. 2003. Caracterización de la reencion potencial máxima de humedad en el suelo del método SCD – CN. Aplicación a una cuenca de México. Ingeniería Hidráulica en México. Vo. XVIII, num 3. Pp 111 – 117.

Sánchez Cohen I. 2005. Fundamentos para el manejo integral del agua. Una aproximación de simulación de procesos. Libro científico No. 2. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Durango. 272 pp.

Sánchez Cohen I., W. Ojeda Bustamante, G. Chebhouni, I. Orona Castillo, J. Villanueva Díaz, J.L. González Barrios y G. González Cervantes. 2008a. Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y económicos. Ingeniería Hidráulica en México vol XXIII, num 4. Pp 5 – 24.

Sánchez Cohen, I., G. Díaz Padilla, J. Estrada Avalos y J. Cueto Wong. 2008b. Incertidumbre climática y toma de decisiones. Consideraciones de riesgo y vulnerabilidad social. Folleto Científico No. 25. INIFAP CENID RASPA. 55 pp.

Sánchez Cohen I., G. Díaz Padilla, T. Cavazos P. y G. R. Granados Ramírez. 2009. Elementos para entender El cambio climático y sus impactos. Publicación especial. INIFAP CENID RASPA, 100 pp. Em prensa.

Wilks, D. S. 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Department of Soil Crop and

Atmospheric Sciences. Academic Press. Ithaca New York. 467 pp.

WWF World Water Forum. 2009. Water and Disaster. High – Level Expert Panel on Water and Disaster. UNSGAB. Istambul Turkey. 21 pp.

CAPITULO 3

Monitoreo ambiental y necesidades hídricas de cultivos

Jaime Garatuza-Payán[1], Julio Cesar Rodríguez[2], y Christopher J. Watts[2]

[1]Instituto Tecnológico de Sonora
[2]Universidad de Sonora

Indice

Resumen
Abstract
Introducción
Red de Estaciones Meteorológicas
Datos de Sensores Remotos
Monitoreo del ambiente con sensores remotos
Necesidades Hídricas de los Cultivos
Medición y estimación de Kc
Estimación de Kc y ET con sensores remotos
Costa de Hermosillo Sonora
Valle del río Yaqui Sonora
Distribución espacial de las variables
Conclusiones
Literatura citada

Resumen

El monitoreo ambiental se refiere a un sistema de seguimiento continuo de observaciones y mediciones de diferentes características del ambiente natural, para su posterior evaluación y pronóstico de los cambios experimentados. Este monitoreo, puede estar constituido por varios sistemas de medición de diferentes componentes de la naturaleza, como son la atmósfera, la biósfera, la hidrósfera y la litósfera evaluándose variables de la calidad del aire, la climatología, la calidad y la cantidad del agua y del suelo, entre otras. En particular, entre los objetivos principales del monitoreo hidroclimatológico y de vegetación se encuentra el uso de los datos para la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos con la finalidad de lograr un uso más eficiente del agua y un mejor manejo de los recursos naturales.
La estimación de las necesidades hídricas de los cultivos o evapotranspiración (ET) es una parte importante del manejo del agua en la agricultura, en estudios de balance regionales y en modelación hidrológica. La tasa de ET es observable usando mediciones físicas que son costosas y difíciles de realizar por lo que comúnmente se estiman con modelos matemáticos. El modelo más común de estimar ET en cultivos bajo riego es multiplicar una ET de referencia (ET0), que representa la demanda de la atmósfera, por un coeficiente de cultivo (Kc), que refleja el estado de la vegetación. La ET de referencia se refiere a un cultivo con suficiente agua y se obtiene comúnmente de alguna versión de la ecuación de Penman que requiere información climatológica medida en estaciones. El factor de cultivo se obtiene de Tablas publicadas en función del estado de desarrollo del cultivo. Estos valores deberían, para una buena estimación, ser calibrados localmente. La disponibilidad de monitoreo de la vegetación con sensores remotos ofrece una oportunidad para la estimación del factor de cultivo a partir de índices de vegetación espectrales observados por los satélites de observación de la Tierra.
En este trabajo se recogen de más de 10 años de experiencias en el Noroeste de México donde se han realizado mediciones de ET en trigo, algodón, cártamo, sorgo, papa, frijol, garbanzo, chile, vid y nogal utilizando la técnica de Correlación Turbulenta, se han determinado factores de cultivo y se han relacionado éstos con índices de vegetación medidos por satélites con diversa resolución. Los resultados muestran que es posible tener mapas de ET para grandes áreas (un distrito de riego, por ejemplo) utilizando los datos de la red de estaciones meteorológicas y datos de sensores remotos.

Abstract

Environmental monitoring refers to a continuous observations and measurements tracking system of the different features in the natural environment, for its subsequent assessment and forecasting of the experienced changes. This monitoring may be made from several measuring systems for the different components of nature, such as the atmosphere, biosphere, the hydrosphere and the lithosphere. Variables being evaluated include those of the air quality, the meteorology, and the quality and quantity of water and soil, among

others. In particular, one of the main objectives of the hydroclimatological and vegetation monitoring, is the use of data for the determination of crop water needs in order to use more efficient water and better management of natural resources.

Crop water needs, or evapotranspiration (ET), is an important issue for water management in agriculture, regional balance studies and hydrological modeling. ET is observable using physical measurements which are expensive and difficult; hence, it is commonly estimated with mathematical models. The most common model to estimate ET in irrigated crops is to multiply a reference ET (ET0), representing the atmospheric demand, by a crop coefficient (Kc), which reflects the vegetation status. Reference ET refers to a crop with enough water and is commonly obtained from a version of the Penman equation, requiring the climatological information normally measured on climatic stations. The crop factor is obtained from published tables, based on the crop stage. For a good estimate, these values should be locally calibrated. The availability of remotely sensed monitoring of vegetation offers a unique opportunity for the crop factor estimation from spectral vegetation indexes observed by Earth observation satellites.

This work collects experiences of more than 10 years in Northwest of Mexico where ET measurements have been carried out on wheat, cotton, safflower, sorghum, potatoes, beans, chickpea, chile, vine and walnut using the Eddy Covariance technique. Crop factors have been calculated and correlated to vegetation indexes measured by satellites with diverse resolution. Results have shown that it is possible to get ET maps for large areas (an irrigation district, for example) using data from remote sensing and from the network of weather stations.

Introducción

El monitoreo ambiental se refiere a un sistema de seguimiento continuo de observaciones y mediciones de diferentes características del ambiente natural, para su posterior evaluación y pronóstico de los cambios experimentados, concepto que no es de reciente creación (Belousova *et al.*, 2006). Durante los 60's y dado el severo deterioro ambiental en muchas partes del mundo, se reconoció la necesidad e importancia de contar con registros de observación ambiental lo que impulsó el establecimiento de las redes de monitoreo (Meadows *et al.*, 1972). Este monitoreo, puede estar constituido por varios sistemas de medición de diferentes componentes de la naturaleza, como son la atmósfera, la biósfera, la hidrósfera y la litósfera evaluándose variables de la calidad del aire, la climatología, la calidad y la cantidad del agua y del suelo, entre otras.

En particular, entre los objetivos principales del monitoreo hidroclimatológico y de vegetación se encuentra el uso de los datos para la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos con la finalidad de lograr un uso mas eficiente del agua y un mejor manejo de los recursos naturales.

El objetivo de este trabajo es mostrar que es posible realizar el monitoreo del uso de agua de la vegetación en general y de cultivos en particular, en tiempo real, utilizando datos de sensores remotos y de las redes de monitoreo hidroclimatológico. Se recogen las experiencias de más de 10 años de trabajos del grupo de micrometeorología del Instituto Tecnológico de Sonora y de la Universidad de Sonora en el Noroeste Mexicano.

Red de Estaciones Meteorológicas

Es por ello que en 1901 se forma el Servicio Meteorológico Nacional con observatorios y estaciones propias e independientes que transmitían información por vía telegráfica. El SMN se integra posteriormente a la Secretaría de Recursos Hidráulicos y, mas recientemente, a la Comisión Nacional del Agua. El SMN, entre otras actividades, también realiza el acopio de la información climatológica nacional y una de sus funciones es proporcionar al público información meteorológica y climatológica realizar estudios climatológicos o meteorológicos. Para ello, el SMN cuenta con una infraestructura de observación de más de 3000 estaciones climatológicas

Debido a la importancia del monitoreo hidroclimatológico para las actividades agroalimentarias del país, la SAGARPA, con apoyo del INIFAP y de las Fundaciones Produce de los Estados, implementaron la Red Nacional de Estaciones Estatales Agroclimatológicas para proveer de información climatológica, en tiempo real, a las cadenas productivas del país y mejorar la competitividad de los Agronegocios. Esta Red brinda información para apoyar los procesos de producción agropecuaria entre los que destacan la aplicación del riego agrícola y está constituida, actualmente por más de 850 estaciones distribuidas en todo el territorio nacional.

Datos de Sensores Remotos

Otro sistema de monitoreo del ambiente lo constituye la constelación satélites de exploración de la superficie de la Tierra. Estos satélites llevan de pasajeros diversos sensores que observan continuamente la Tierra (sin necesidad de estar en contacto directo con ella) en diferentes regiones del espectro electromagnético. Las observaciones están compuestas por mediciones de la energía que es reflejada o emitida por los objetos en la superficie, incluidas las nubes. La interpretación de estas mediciones se basa en la distintiva manera (firma espectral) en que cada objeto refleja la energía electromagnética que incide sobre él o en la cantidad de energía que emite en función de su temperatura (ley de Stefan-Boltzman). Existe una diversidad de satélites y sensores de uso en monitoreo del ambiente. La Tabla 1 muestra un listado, que de ninguna manera es exhaustivo, de los satélites y sensores de uso más común en México. Se usan, principalmente, sensores en las regiones (o bandas) visible (VIS), infrarrojo cercano (IRC) y térmica del espectro electromagnético. La capacidad de observar de manera consecutiva el mismo sitio (resolución temporal) va desde los 15 minutos hasta los 26 días. La superficie mínima (resolución espacial) que puede ser detectada por un determinado sensor puede tomar valores de 2 m hasta 4 km.

Tabla 1. Características de los principales satélites/sensores con posible aplicación para estimación de uso de agua por la vegetación. VIS es la banda en el visible, IRC es la banda en el infrarrojo cercano y PAN es la banda en el pancromático.

Satélite/Sensor	*Bandas*	*Resolución Espacial*	*Temporal*
GOES	*Térmica*	*4 km*	*15 min*
	VIS	*1 km*	*15 min*
MODIS	*VIS/IRC*	*250 m*	*1 – 2 d*
	Térmica	*1 km*	*1 – 2 d*
Landsat	*VIS/PAN*	*30 m*	*16 d*
	Térmica	*60 m*	*16 d*
SPOT	*VIS/PAN*	*10/5 m*	*5-26 d*
Formosat	*VIS/PAN*	*8/2 m*	*3- d*

En general y en el contexto del uso de agua por la vegetación, los sensores remotos montados sobre satélites se utilizan principalmente para estimar la cantidad de biomasa verde fotosintéticamente activa presente en un sitio determinado y para "medir" la temperatura de la vegetación en comparación con la temperatura del aire, lo que puede dar una idea del estrés hídrico de la vegetación. Para el monitoreo de vegetación se utilizan, comúnmente, índices de vegetación espectrales basados en relaciones entre distintas bandas. El mayormente utilizado de éstos es el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = (\rho NIR - \rho RED) / (\rho NIR + \rho RED)$$

donde ρNIR y ρRED son las reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano y del rojo, respectivamente.

Monitoreo del ambiente con sensores remotos

Existen muchos casos del uso de sensores remotos en monitoreo del ambiente en México, por ejemplo, Lobell *et al.* (2003), describe sus experiencias en el Valle del Yaqui en el estado de Sonora, México, en la estimación de rendimientos de cultivos de trigo utilizando datos de LandSat. En otro ejemplo, Rodríguez *et al.* (2001, 2003 y 2004) llevaron a cabo el monitoreo de cultivo y pronóstico de las cosechas utilizando imágenes MODIS en el Valle del Yaqui, Sonora, para investigar la viabilidad del uso de MODIS en una parcela de 80 hectáreas de trigo. Lobell y Asner (2004), desarrollaron y probaron una aproximación de desagregación lineal con MODIS que estima fracciones de tipo de cultivo dentro de un píxel, basados en las firmas espectrales temporales a través de la temporada de crecimiento y lo aplicaron en el Valle del Yaqui en Sonora y las Grandes Planicies Sureñas de los EEUU, demostrando la importancia de la heterogeneidad subpixel en los sistemas de cultivo y el potencial de la desagregación temporal para proveer estimaciones rápidas y confiables de la distribución de cobertura del suelo utilizando sensores de resolución amplia tal como MODIS.

Hudson y Colditz (2003) combinaron datos de sensores remotos y acercamientos geomorfológicos para delinear la extensión de un gran huracán provocando una inundación en la parte baja del Pánuco. Salinas-Zavala *et al.* (2002), analizaron la relación entre la variabilidad inter-anual de un índice de vegetación (NDVI), la precipitación y la circulación atmosférica a 700 mbar en el noroeste de México, durante las fases fría y caliente de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) encontrando que la fase negativa del ENSO está asociada con las condiciones de sequía.

Dentro de una larga tradición de aplicaciones de sensores remotos para la estimación de variables hidrológicas, al inicio de los 90´s Garatuza y Watts (1993) utilizaron los datos del satélite geoestacionario GOES para estimar el área de cobertura de nieve y construyeron un sistema computacional para estimar diferentes variables utilizando datos de GOES recibidos directamente en una estación de recepción localizada en el Instituto Tecnológico de Sonora (Stewart *et al.*, 1995). Shuttleworth *et al.*, (1995) mapear diversos parámetros de la vegetación, al norte de Sonora, con sensores remotos y Garatuza *et al.* (200 1a) y Yucel *et al.* (1998), realizaron observaciones de nubosidad de alta resolución con datos del satélite GOES. También se han realizado estimaciones de radiación solar utilizando datos del mismo satélite, colectados en la estación receptora de ITSON (Watts *et al.*, 1995, Watts *et al.*, 1999, Stewart *et al.*, 1999, Garatuza *et al.*, 2001b y Garatuza *et al.*, 2001c). Ellos demostraron la existencia de algunos rasgos importantes de la nubosidad en el noroeste de México y su uso en una nueva estimación de radiación solar de alta resolución, variables valiosas ambas en el monitoreo ambiental con fines de estudios hidrológicos y de manejo integral del agua.

En lo que se refiere a la medición, modelación y estimación de la evapotranspiración, como un indicador de las necesidades hídricas, diversos trabajos han sido realizados por Garatuza *et al.* (1998, 2001d, 2003 y 2005b), Garatuza y Watts (2005), Méndez-Barrozo *et al.* (2008) y Unland *et al.* (1997), integrando información colectada in situ y datos remotamente censados de alta y baja resolución (ver figuras 1 y 2). Además, se han llevado a cabo estimaciones de los flujos de superficie sobre mosaicos de campos agrícolas y el desarrollo de reglas de agregación para la estimación de flujos de calor sensible utilizando sensores remotos (Watts *et al.*, 2001; Chehbouni *et al.*, 2001 y 2008).

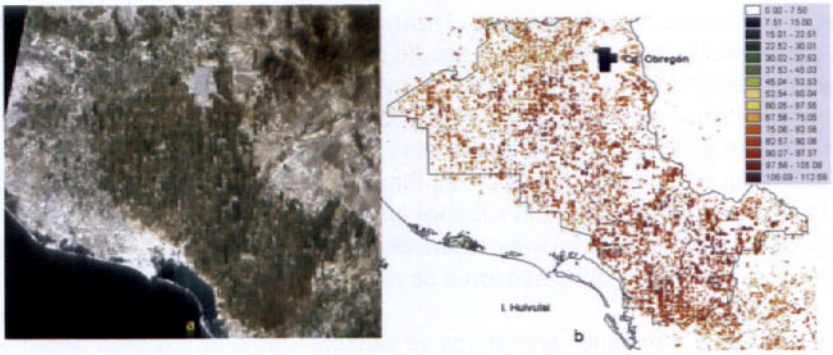


Figura 1. a) Composición en color real (Landsat 1, 2, 3) y b) evapotranspiración (en W m^{-2}) en trigo en el Valle del Yaqui, México en un día durante la temporada de crecimiento del 2000.

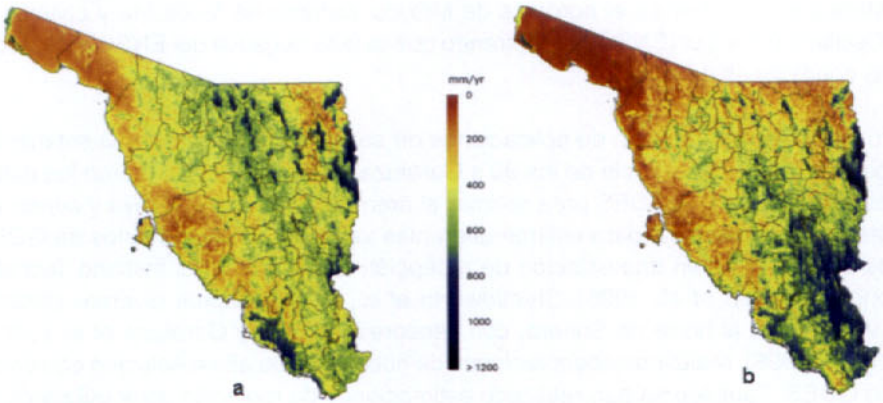


Figura 2. Evapotranspiración anual en Sonora, México (a) de Octubre de 1999 a Septiembre del 2000 basada en datos de NOAA-AVHRR, y (b) de Octubre del 2002 a Septiembre del 2003 basada en datos de MODIS. Los limites administrativos (municipios) fueron sobrepuestos.

Necesidades Hídricas de los Cultivos

La estimación de las necesidades hídricas de los cultivos o evapotranspiración (ET) es una parte importante del manejo del agua en la agricultura, en estudios de balance regionales y en modelación hidrológica. A escala de parcela, ET es importante en la planeación y calendarización del riego y es una parte integral de las herramientas de apoyo a la toma de decisiones en el manejo de la parcela (Abrahamsen and Hansen, 2000; Garatuza and Watts, 2005).
La tasa de ET es observable usando mediciones físicas que son costosas y difíciles de realizar. La manera mas común de estimar ET en cultivos bajo riego es multiplicar una ET de referencia (ETo), que representa la demanda de la atmósfera, por un coeficiente de cultivo (o factor de cultivo, Kc), que refleja el estado de la vegetación (Garatuza and Watts, 2005):

$$ET = Kc * ETo$$

La ET de referencia se refiere a un cultivo de pasto bien establecido, que no tiene estrés hídrico, en crecimiento activo, cubriendo completamente el suelo y se obtiene comúnmente de alguna versión de la ecuación de Penman (Penman, 1948) que requiere información de radiación neta, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Desafortunadamente, existen muchas formulaciones de esta ecuación y el método, en ocasiones, ha sido mal aplicado pero, convenientemente, el concepto ha sido "estandarizado" en la publicación de FAO-56 (Allen *et al.*, 1998). Una buena estimación de ET incluye la integración de varios factores como características y estado de desarrollo del cultivo, parámetros climáticos y prácticas de manejo. Los parámetros climáticos están incluidos en la ETo mientras que el estado de desarrollo del cultivo y las prácticas de manejo, se incluyen en el factor de cultivo (Kc).

Medición y estimación de Kc

Los mencionados factores son específicos de cada cultivo y cambian a lo largo del período de crecimiento del cultivo, a medida que la cobertura vegetal, la altura y el área foliar cambian con el desarrollo. Allen *et al.* (1998) dividieron la etapa de desarrollo del cultivo en cuatro fases con diferentes valores de Kc: inicio, desarrollo, estabilización y senescencia y presentan tablas con valores de estos coeficientes para una gran variedad de cultivos, recomendando la calibración local de los mismos. Mucho trabajo se ha realizado para determinar los coeficientes de cultivos en diferentes regiones, para diferentes cultivos y bajo diferentes prácticas de manejo. La determinación de Kc implica la medición de la ET real y la estimación, a partir de variables climáticas, de ETo, es decir:

$$Kc=ET / ETo$$

Algunos ejemplos de la determinación de Kc para diferentes tipos de cultivos (anuales, perenes, frutales, etc.), bajo diferentes prácticas de manejo (riego por gravedad, por goteo, etc.) incluyen a Garatuza *et al.* (1998), que describieron funciones de Kc dependientes del tiempo y de las prácticas de riego para cultivos de trigo y algodonero en el Valle del Yaqui a partir de mediciones de ET real por correlación turbulenta. Benli *et al.* (2006) determinaron Kc para alfalfa en las condiciones semiáridas de la planicie de Anatolia en Turquía utilizando un lisímetro de pesada. Wanga *et al.* (2007) estimaron coeficientes de cultivo para nogal abierto, en Nuevo México, utilizando cuatro métodos diferentes para medir ET real y desarrollaron una ecuación para Kc que es función de la cobertura efectiva. Hanson y May (2006) determinaron Kc para el cultivo de tomate bajo riego por goteo en California utilizando la relación de Bowen y el balance de energía como método para medir ET real. Ellos describen una relación de segundo orden entre Kc y cobertura de la vegetación y desarrollaron curvas que describen la variación de Kc con el tiempo para diferentes fechas de siembra. Kang *et al.* (2002) determinaron Kc y la relación de transpiración para trigo y maíz en una región de clima semi-árida del noroeste de China utilizando lisímetros para medir ET real y encontraron una relación, en la forma de polinomio de quinto orden, entre Kc y el número de días transcurridos desde la siembra. Por su parte, Kjaersgaard *et al.*, (2008) determinaron Kc también para trigo pero en una región con clima de régimen frío sub-húmedo, utilizando correlación turbulenta para la medición de ET real y estimaciones de Radiación Neta para ETo, encontrando valores de Kc superiores a los utilizados. De Azevedo *et al.* (2007), realizaron mediciones de ET real utilizando el balance de energía y la relación de Bowen para estimar valores de Kc en un cultivo de piña en una región tropical de Brasil encontrando que el factor de cultivo es afectado tanto por el comportamiento de las condiciones climáticas como por la compleja interacción de los factores fisiológicos.

Como se puede concluir a partir de la lista (que de ninguna manera es exhaustiva) de ejemplos anteriores, mucho esfuerzo se dedica a tratar de determinar los valores del factor de cultivo en muy variadas regiones del mundo, desde los climas fríos hasta los tropicales; para muy diversos cultivos, desde cultivos perenes a anuales, desde los que cubren completamente el suelo hasta los que solo cubren un pequeña porción del mismo, desde los de muy bajo porte hasta árboles frutales de considerable altura; y con diferentes prácticas de manejo. Se utilizan también todas las metodologías disponibles para medición de la evapotranspiración real y, en todos los casos, se concluye que Kc es función de alguna variable, como tiempo o cobertura, y se recomienda alguna función para su uso posterior.

Estimación de Kc y ET con sensores remotos

Como anteriormente se mencionó, la medición de ET no es trivial y requiere de equipo costoso y personal especializado, independientemente del método por el que se realice (lisímetros, balance de humedad en el suelo, correlación turbulenta, etc.).

Además, los factores de cultivo determinados a partir de mediciones de ET no tienen, realmente, una aplicación universal ya que, desafortunadamente, los cultivos no se desarrollan igual todos los años y en todos los lugares, aún dentro de un mismo esquema de riego, ni las prácticas de manejo son las mismas en todos los predios. Es necesario, entonces, buscar maneras de realizar "mediciones" de dicho factor de cultivo. Estas mediciones deben ser fáciles de hacer, de bajo costo y en tiempo real. Afortunadamente, los mismos factores que afectan al factor de cultivo afectan también a los índices espectrales de vegetación y diversos autores han investigado en su posible relación (ver, por ejemplo, Garatuza and Watts, 2005, Zwart *et al.*, 2006, Jayanthi *et al.*, 2007, Rodríguez *et al.*, 2009, entre muchos otros).

El grupo de micrometeorología del Instituto Tecnológico de Sonora y de la Universidad de Sonora, han trabajado recientemente en realizar mediciones de evapotranspiración real en diversos cultivos y en vegetación natural con la finalidad de determinar factores de cultivo y encontrar relaciones de dichos factores con otras variables, principalmente con índices de vegetación espectrales que pueden ser medidos desde satélites. Los trabajos de este grupo han sido desarrollados mayoritariamente en el Valle del Yaqui y en la Costa de Hermosillo, Sonora.

A continuación se describen algunos resultados obtenidos recientemente por el mencionado grupo de micrometeorología para los principales cultivos de la región. El grupo cuenta con varios sistemas de correlación turbulenta como se describe en Scott *et al.* (2003) y Pérez-Ruíz *et al.* (2009). Los protocolos de medición fueron los reportados por los anteriores autores.

Costa de Hermosillo Sonora

Se realizó un experimento en la Costa de Hermosillo durante 2005-2006 para medir ET real con dos sistemas de correlación turbulenta en uva de mesa (variedades Perlette y Superior) y en nogal. Se utilizaron los datos climatológicos puntuales de la red de estaciones de INIFAP para generar mapas de ETo para todo el Distrito de Riego de la Costa de Hermosillo (Figura 2). La interpolación espacial se realizó por el inverso de la distancia al cuadrado. Se colectaron todas las imágenes disponibles del Satélite Landsat (17 en total) y, para los días en que se contó una imagen de satélite, se extrajo el valor correspondiente de ETo. Kc fue calculado como el cociente de ET medido (real) y ETo. En la Figura 3 se presentan los resultados del Kc calculado de la manera descrita y NDVI para el sitio de ubicación del cultivo donde se realizaron las mediciones. Se observa que el mejor ajuste está dado por una función lineal con pendiente cercana a 1.

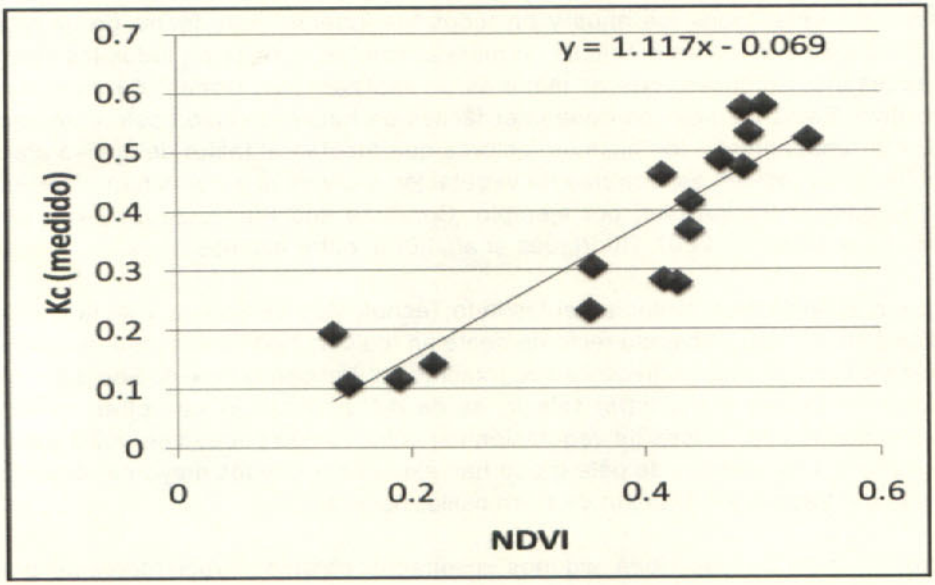


Figura 3. Relación de Kc y NDVI para un cultivo de uva de mesa en la Costa de Hermosillo durante 2005-2006. Los valores de Kc fueron "medidos" con un sistema de correlación turbulenta y NDVI fue obtenido de imágenes LandSat.

Valle del río Yaqui Sonora

Durante 2008 se realizó otro experimento en el Valle del Yaqui, Sonora, dentro del contexto del proyecto PLEIADES. Se realizaron mediciones de ET mediante correlación turbulenta en 8 diferentes cultivos (Trigo, sorgo, brócoli, chile, cártamo, garbanzo, papa y frijol), se recabó y midió toda la información relevante de los cultivos y su manejo y se colectaron todos los datos de sensores remotos disponibles (GOES, MODIS, Landsat). La agencia francesa CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) proporcionó 40 imágenes del satélite Formosat (8 m de resolución) de las que se determinó NDVI y se extrajo su valor en cada uno de los sitios de medición. Para el cálculo de ETo se utilizaron los datos de la estación climatológica de la red de INIFAP más cercana al sitio del experimento (Estación Block 1418). Kc fue calculado como el cociente de ET medido (real) y ETo de la estación. En la Figura 4 se presentan los resultados del Kc calculado de la manera descrita para seis de los cultivos y NDVI para el sitio de ubicación de cada cultivo donde se realizaron las mediciones (1 pixel). La ecuación lineal de ajuste (con intercepto), para cada cultivo, se presenta junto a la leyenda. Se observa, en todos los casos, que una función lineal, con pendiente cercana a 1, proporciona un buen ajuste (aunque no siempre el mejor).

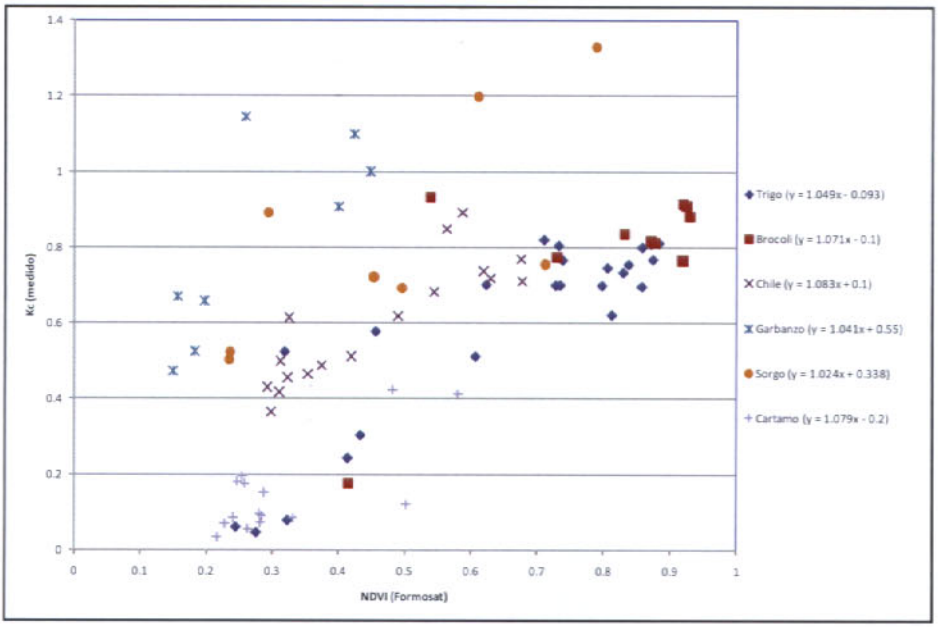


Figura 4. Relación de Kc y NDVI para seis diferentes cultivos en el Valle del Yaqui, Sonora, durante 2008. Los valores de Kc fueron "medidos" con un sistema de correlación turbulenta y NDVI fue obtenido de imágenes Formosat. Junto a la leyenda se describe la ecuación lineal para cada cultivo.

Distribución espacial de las variables

Las mediciones ET real y de las variables climáticas son, generalmente, puntuales y representativas de una pequeña área alrededor del sitio de medición. Las mediciones, con sensores remotos de índices de vegetación, como una variable predictiva del factor de cultivo, ya están espacializadas y en formato raster y se puede aprovechar esta característica para espacializar Kc y ET real.

Finalmente, las ecuaciones lineales de Kc como función de NDVI, son utilizadas en algebra de mapas para crear mapas de Kc y ET real, cuando se combinan con mapas de ETo derivados de la red de estaciones meteorológicas. La Figura 5 muestra estos resultados para tres fechas en un área del Valle del Yaqui durante el ciclo de desarrollo del cultivo de trigo. Se presentan solo las áreas sembradas con trigo mientras que el resto han sido enmascaradas. La primer columna corresponde al día 3 de enero del 2008, cuando el cultivo de trigo apenas inicia en la región e incluso en algunas zonas aún no emerge. La segunda columna corresponde al 23 de febrero del 2008 cuando el trigo, en todo el

distrito, está en pleno desarrollo y, en la tercer columna se presenta el día 27 de abril del 2008, en la etapa de desarrollo final, cuando la mayor parte del cultivo se encuentra senescente. Nótese la mancha distintiva hacia la parte superior derecha de los mapas del 23 de febrero. En esta zona sucedió algo con el cultivo que no le permitió desarrollarse igual que en los alrededores.

En la primera hilera de mapas se muestra el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) observado por el satélite Formosat. Los valores van de cero a uno aumentando con la cantidad de biomasa presente en la superficie. En la segunda hilera se presentan los mapas de Kc para las tres fechas y, por último, en la tercer columna se muestran los mapas de ET real para las mismas fechas en mm dia^{-1}. En la segunda fecha (23/03/2008) el cultivo se encuentra traspirando activamente y muestra los mayores valores, hasta de 7 mm dia^{-1}, en contraste con la fecha final cuando la vegetación está casi seca en algunos lugares, mientras que en otras, con fechas de siembra mas tardías o variedades de ciclo mas largo, el cultivo aún tiene actividad.

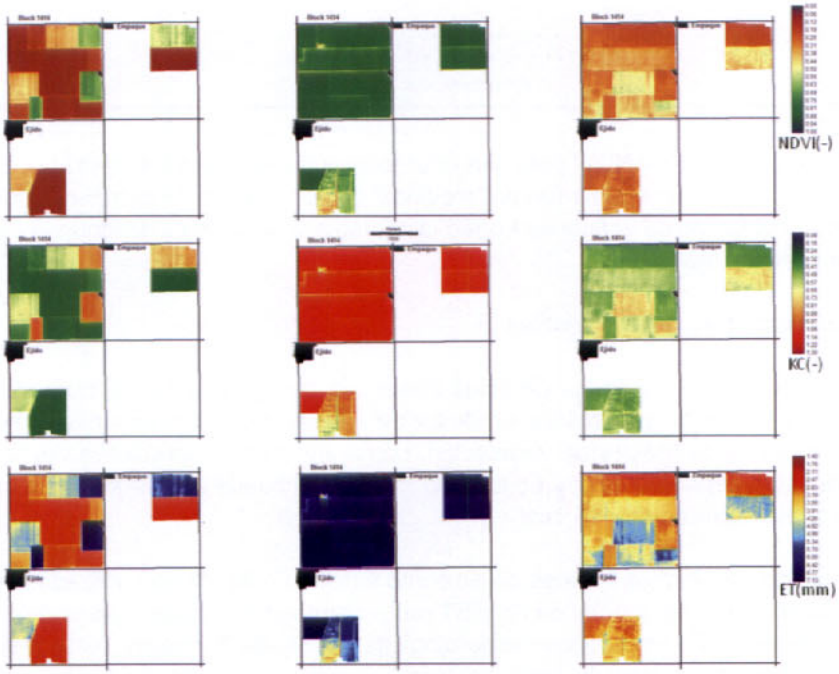


Figura 5. NDVI (hilera 1), Factor de Cultivo (Kc, hilera 2) y ET real (hilera 3) para tres fechas durante el ciclo de desarrollo de Trigo en el Valle del Yaqui, Sonora. Se presentan solo las áreas sembradas con trigo mientras que el resto han sido enmascaradas. Las fechas son 3 de Enero (columna 1), 23 de Febrero (columna 2) y 27 de Abril (columna 3) del 2008

Conclusiones

La estimación del uso y demanda de agua por los cultivos es un factor importante en la planeación y operación de los sistemas de riego y en los estudios hidrológicos para determinar la disponibilidad hídrica en una región. Su determinación confiable es costosa y difícil por lo que, comúnmente se hace uso de modelos, el mas usado de los cuales es el de dos pasos propuesto por la FAO. Este modelo involucra, por una parte, la estimación de una ET de referencia que se calcula a partir de datos meteorológicos colectados en las redes de monitoreo climático del ambiente y, por otra, la "medición" de un factor de cultivo.

Los factores que afectan el factor de cultivo son los mismos que afectan la evolución de los índices de vegetación espectrales, basados en la reflectancia de la vegetación en las regiones del rojo y del infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Es posible, entonces, establecer relaciones funcionales entre índices de vegetación y factor de cultivo que permitan la estimación de este último a partir de observaciones rutinarias de los primeros realizadas, por los satélites de observación de la Tierra.

Los resultados de muchos experimentos realizados por los autores muestran que dicha relación puede, generalmente, ser aproximada por una función lineal con pendiente cercana a 1 y con intercepto variable que depende del tipo y cobertura del cultivo.

Lo anterior abre la puerta a la oportunidad de utilizar una familia de ecuaciones lineales con pendiente de 1 e intercepto variable, en función del tipo y cobertura del cultivo, para realizar estimaciones en tiempo real, para grandes áreas y con la necesaria resolución espacial y temporal para ser usadas operacionalmente en la programación del riego. Para ello se deberá de disponer, además de los datos de monitoreo climatológico, de la información de sensores remotos montados en satélites o aeronaves y de un medio para hacer llegar la información a los usuarios finales con oportunidad.

Literatura citada

Abrahamsen, P., Hansen, S., 2000. Daisy: an open soil–crop–atmosphere system model. Environ. Model. Software 15, 313–330

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irr. Drain, Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 300 pp.

Belousova, Anna P., Irina K Gavich, Aleksandr B. Lisenkov y Evgenii V. Popov (2006), *Hidrogeología ecológica,* Moscú, Rusia, Editorial IKC Akademkniga.

Benli, B., Kodal, S., Ilbeyi, A. and Ustun, H. (2006). Determination of evapotranspiration and basal

crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. Agricultural Water Management, Vol. 81, pp 358–370.

Chehbouni, A., Watts, C., Rodríguez, J. C., Santiago, F., Garatuza-Payán, J. and J. Schieldge, 2001."Area-estimates of surface fluxes over a mosaic of agricultural fields". In: Remote Sensing and Hydrology 2000, Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, April 2000, edited by Manfred Owe, Kaye Brubaker, Jerry Richtie & Albert Rango, IAHS Publ. no. 267, 220-222.

Chehbouni, A., Hoedjes, J. C. B., Rodriquez, J. C., Watts, C. J., Garatuza, J., Jacob, F., and Y. H. Kerr. 2008. Using remotely sensed data to estimate area-averaged daily surface fluxes over a semi-arid mixed agricultural land. Agricultural and Forest Meteorology, 148: 330- 342.

De Azevedo P. V., de Souza, C. V., da Silva, B.B. and da Silva, V. P. R. 2007. Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment, Brazil. Agricultural Water Management, Vol. 88, pp 201–208.

Garatuza-Payan, J. y C.J. Watts. 1993. "El uso de Imágenes de Satélite en la Estimación de Areas Cubiertas por Nieve". Revista ITSON-DIEP, Ciudad Obregón, México. I No. 4, pp 3-15.

Garatuza-Payán, J. Shuttleworth, W.J., Encinas, D., Mc. Neil, D.D., Stewart, J.B., deBruin, H. and C.J. Watts. 1998. "Measurement and Modelling Evaporation for Irrigated Crops in Northwest Mexico". Hydrological Processes, Vol 12, 1397-1418.

Garatuza-Payan, J., Pinker, R.T. and W. J. Shuttleworth, 2001a. "High resolution day-time cloud observations for northwestern Mexico from GOES-7 satellite data". Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 105, No. 1, pp. 39-56.

Garatuza-Payan, J., Shuttleworth, W. J. And R. Pinker, 2001b, "Satelite measurements of solar radiation in the Yaqui Valley, Northern Mexico", Geofísica Internacional, Vol 40, No.3, pp 207-218.

Garatuza-Payan, J., Pinker, R.T., Shuttleworth, W. J. and C. Watts, 2001c, "Solar radiation and evapotranspiration in northern Mexico estimated from remotely sensed measurements of cloudiness". Hydrological Sciences Journal, Vol 46, No. 3, pp. 465-478.

Garatuza-Payan, J., Pinker, R.T., Shuttleworth, W. J. and C. Watts, 2001d. "Remotely Sensed Estimates of Evaporation for Irrigated Crops In Northern Mexico". In: Remote Sensing and Hydrology 2000, Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, April 2000, edited by Manfred Owe, Kaye Brubaker, Jerry Richtie & Albert Rango, IAHS Publ. no. 267, pp. 286-291.

Garatuza-Payan, J., A. Tamayo, C. Watts and J.C. Rodríguez, 2003, "Estimating Large Area Wheat Evapotranspiration from Remote Sensing Data", 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, I: 380 – 382

Garatuza-Payan, J. Bastiaanssen, W. and C. Watts, 2005. Estudio histórico de uso y extracción del agua subterránea en dos áreas-piloto del Estado de Sonora. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, Reporte Final, 113p.

Garatuza-Payan, J. and C. J. Watts, 2005 "The use of remote sensing for estimating ET in NW Mexico", Irrigation and Drainage Systems Vol 19: 301-320.

Hanson, B. R. and May. D. M. 2006. Crop coefficients for drip-irrigated processing tomato. Agricultural Water Management, Vol. 81, pp 381–399.

Hudson, P. F. and R. R. Colditz, 2003. Flood delineation in a large and complex alluvial valley, lower Panuco basin, Mexico. Journal of Hydrology 280 (2003) 229–245

Jayanthi, H., Neale, C. M. U. and Wright, J. L. 2007. Development and validation of canopy reflectance-based crop coefficient for potato. Agricultural Water Management, Vol. 88, pp 235–246.

Kang, S., Binjie, G., Taisheng, D., and Zhang J. 2002. Crop coefficient and ratio of transpiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. Agricultural Water Management, Vol. 59, 239–254

Kjaersgaard, J. H., Plauborg, F., Mollerup, M., Petersen, C. T. and Hansen, S. 2008. Crop coefficients for winter wheat in a sub-humid climate regime. Agricultural Water Management, Vol. 95, 918–924

Lobell, D. B., Asner, G. P., Ortiz-Monasterio, J. I. and T. L. Benning, 2003. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. Agriculture, Ecosystems and Environment 94 (2003) 205–220.

Lobell, D. D. and G. P. Asner, 2004. Cropland distributions from temporal unmixing of MODIS data. Remote Sensing of Environment 93 (2004) 412– 422.

Meadows, Danella H., Denis L. Meadows, Jorgen Randers and William W. Behrens III (1972), *Limits to Growth,* New York, USA, Universe Books.

Mendez-Barroso, L. A., Garatuza-Payan, J. and Vivoni, E. 2008. Quantifying Water Stress on Wheat using Remote Sensing in the Yaqui Valley, Sonora, Mexico. Agricultural Water Management. 95(6): 725-736. DOI: 10.1016/j.agwat.2008.01.016

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proceedings of the Royal Society of London A193: 120–143.

Perez-Ruiz, E. R., Garatuza-Payan, J., Watts, C. J., Rodriguez, J. C., Yepez-Gonzalez. E. A., 2009.

Carbon dioxide and water vapor exchange in a tropical dry forest as influenced by the North American Monsoon System (NAMS). *Journal of Arid Environments* (sometido).

Rodriguez, J.C., Watts, C., Maubert, G., Garatuza-Payan, J., Tamayo, A., Palacios, L. y E. Palacios, 2001. Monitoreo de Cultivos Utilizando Imágenes Modis. GEOS, Unión Geofísica Mexicana, Reunión Anual 2001 (ISSN 0186-1891). Vol. 21, No. 3, P. 349.

Rodriguez, J.C., B. Duchemin, C.J. Watts, R. Hadria, J. Garatuza, A. Chehbouni, G. Boulet, M. Armenta and S. Er-Raki, 2003, "Wheat Yields Estimation Using Remote Sensing and Crop Modeling in Yaqui Valley in Mexico", 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IV: 2221 – 2223.

Rodriguez, J. C., Duchemin, B., Hadria, R., Watts, C., Garatuza, J., Chehbouni, A., Khabba, S., Bouletb, G., Palacios, E. and A. Lahrounic, 2004. Wheat yield estimation using remote sensing and the STICS model in the semiarid Yaqui valley, Mexico. Agronomie 24 (2004) 295–304.

Rodriguez, J. C., J. Grageda, A. Castellanos-Villegas, J. Rodriguez-Casas, J. Saiz-Hernandez, C. J. Watts, J. Garatuza-Payan and V. Olivarrieta. 2009. Water use by perennial crops in the lower Sonora watershed. *Journal of Arid Environments* (sometido).

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Proceeding of the 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, vol. 1. pp. 48–62.

Salinas-Zavala C.A., Douglas, A. V. and H. F. Diaz, 2002. Inter-annual Variability of NDVI in Northwest Mexico. Associated Climatic Mechanisms and Ecological Implications. Remote Sensing and Environment 82 (2-3): 417-430 p.

Scott, R. L., C. Watts, J. Garatuza-Payan, E. Edwards, D. C. Goodrich, D. Williams and W. J. Shuttleworth, 2003, "The understory and overstory partitioning of energy and water fluxes in an open canopy, semiarid woodland", Agricultural and Forrest Meteorology, Vol. 114, pp 127-139.

Shuttleworth, W.J., M.A. Arain, J. Michaud, J. Garatuza, Z.-L. Yang and A.J. Dolman. 1995. "Mapping vegetation parameters with remotely sensed landcovers and P1PE- and ABRACOS-validated aggregation rules". EOS, Transactions, American Geophysical Union, Spring Meeting, Supplement, Vol. 76, No. 17, page S 116.

Stewart J.B., H.R.R. de Bruin, J. Garatuza-Payan and C.J. Watts. Sept. 1995. "Use of satellite data to estimate hydrological variables for northwest Mexico", 21st Annual Conference of the International Society of Remote Sensing, Southampton, UK, p. 91 - 98.

Stewart, J.B., Watts, C. J., Rodríguez, J. C., de Bruin, H. A. R., van den Berg, A. R, and J. Garatuza-Payan, 1999. "Use of satellite data to estimate radiation and evaporation for northwest Mexico".

Agricultural Water Management, 38: 181-193.

Unland, E.H., Arain, A.M, Harlow, C., Houser, P.R., Garatuza-Payan, J., Scott, P., Sen, O.L., and W.J. Shuttleworth. 1997. "Evaporation from a Riparian System in a Semi-Arid Environment". Hydrological Processes, Vol 12, 527-542.

Wanga, J., Sammis, T. W., Andales, A. A., Simmons, L. J., Gutschick, V. P. and Miller, D. 2007. Crop coefficients of open-canopy pecan orchards. Agricultural water management, Vol 88, pp 253–262.

Watts, C.J., J.C. Rodriguez, J. Garatuza-Payan, H.R.R. de Bruin and J.B. Stewart,1995. "Estimates of Solar Radiation from GOES data on Northwest Mexico", 21st Annual Conference of the International Society of Remote Sensing, Southampton, UK, p. 930-910.

Watts, C. J., Rodríguez, J. C., Garatuza-Payán, J., de Bruin, H. A. R. and J. B. Stewart, 1999. "Estimación de evaporación y radiación solar en el valle del Yaqui, Sonora, usando datos de satélite", Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XIV, 3: 45-53.

Watts, C., Chehbouni, A., Rodríguez, J. C., Santiago, F., Garatuza-Payán, J. and J. Schieldge, 2001. "Aggregation rules for sensible heat flux estimates over agricultural fields in Mexico". In: Remote Sensing and Hydrology 2000, Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, April 2000, edited by Manfred Owe, Kaye Brubaker, Jerry Richtie & Albert Rango, IAHS Publ. no. 267, pp. 217-219 .

Yucel, I., Garatuza-Payan, J., Toth, J.J., Shuttleworth, J.J. and R.T. Pinker. 1998. "Cloud Screened Surface Radiation Estimates with High Resolution from Goes-9 Data". American Meteorological Society, Special Symposium on Hydrology, Phoenix, Arizona. Paper-P2.2.

Zwart, S.J. ,S. J., Bastiaanssen, W.G.M., Garatuza-Payan, J., and C.J. Watts, 2006. SEBAL For Detecting Spatial Variation Of Water Productivity For Wheat In The Yaqui Valley, Mexico. *AIP Conference Proceedings* -- August 23, 2006 -- Volume 852, pp. 154-161 (ISSN 0094-243X).

CAPITULO 4

Cambio climático y vulnerabilidad ecológica: impacto en el recurso suelo como sumidero de carbono

Armando López Santos[1], Martín Cadena Zapata[2], Alejandro Zermeño González[2], Guillermo González Cervantes[3], Aurora Sombrero Sacristan[4]

[1]Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo.
[2]Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah., México.
[3]Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del INIFAP-México;
[4]Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León, España.

Índice

Resumen
Abstract
Introducción
Objetivo
Metodología
- Características ecológico-geográficas del área estudiada
- Descripción de las parcelas experimentales
- Diseño general de la investigación
- Técnicas empleadas
- Covarianza Eddy (CE) e instrumentos de medición
- Análisis de imagen
- Métodos de labranza evaluados
- Variables medidas
- Variables de flujo y técnica de análisis
- Variables porosimétricas y técnica de análisis

Resultados y Discusión
- Efecto del laboreo sobre la porosidad en el perfil del suelo
- Medición indirecta de la porosidad total, Pt
- Superficie y distribución de la porosidad en el perfil
- Impacto sobre la geometría de poros
- Efecto de la labranza en la dinámica de CO_2
- Comportamiento del CO_2: escenarios de emisión y pérdida de *C*
- Relación entre las propiedades físicas del suelo y la dinámica de CO_2

Conclusiones
Literatura citada

Resumen

Se evaluó el efecto de dos tipos de la labranza primaria, uno con multiarado (LM) y el otro con arado de discos (LAD), teniendo como referencia un área sin labranza (NL), sobre las propiedades porosimétricas y la dinámica del dióxido de carbono (CO_2) de la capa superior del suelo. Las parcelas del experimento se ubicaron en el Rancho "Los Ángeles", Municipio de Saltillo, Coahuila, México (25° 6.650' N y 100° 59.413' O). Durante el verano del 2007, se hicieron las mediciones de CO_2 y otros flujos energéticos según el método de la Covarianza Eddy. Las propiedades de porosidad se realizaron con un muestreo aleatorio mediante monolitos de 0.15 m^3, según la Técnica Avanzada de Análisis de Imagen. Los resultados indicaron efectos altamente significativos ($p > 0.01$) para ambos tipos de labranza (LM y LAD) sobre la porosidad en el perfil a 5 cm de profundidad. El efecto de la labranza fue evidente al modificarse el patrón de asimilación diurna y liberación nocturna. Tanto LM como LAD se comportaron como fuentes de emisión de CO_2 sin asimilación alguna durante todo el periodo de medición. A partir de las tasas instantáneas se hizo una estimación de emisión de CO_2 para los dos tratamientos, los cuales alcanzaron valores de 4.605 y 2.371 g de CO_2 $m^{-2}d^{-1}$, para LM y LAD, respectivamente.

Abstract

The effect of two types of tillage on soil porosity properties and on the dynamics of carbon dioxide (CO_2) at the topsoil was evaluated. Tillage treatments were a multi-plough (LM) and plow disks (LAD), in comparison to non-till (NL) as control. The experimental site is located at "Los Angeles" in Saltillo, Coahuila, Mexico (25 ° 6.650' N, 100 ° 59.413' O). During the summer of 2007, the CO_2 and other energy flows were measured based on the Eddy Covariance method. Porosity properties were assessed by random sampling of 0.15 m^3 monoliths on the experimental plots. The monoliths were analyzed with the Advanced Image Analysis Technique. Results have indicated high significant effects ($p > 0.01$) for both types of tillage (LM and LAD) on the soil porosity at 5 cm depth. The effect of tillage was evident in the pattern of change in the CO_2 daily uptake and CO_2 night release. Both, LM and LAD, behaved as sources of CO_2 emission with no assimilation over the measurement period. The estimates of CO_2 emission for both treatments were obtained from instant rates, being 4.605 and 2.371 g CO_2 $m^{-2}d^{-1}$ to LM and LAD, respectively.

Introducción

Estudios recientes indican que los cambios de uso del suelo y las actividades agrícolas contribuyen con un 34 % en las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI); de los que destacan emisiones de CO_2 en mayor proporción para el primero, y de metano (CH_4) para el segundo (Lokupitiya y Paustian, 2006; IPCC, 2007).

La mecanización de la agricultura y particularmente la labranza primaria tiene como fin primordial romper el suelo para mejorar la estructura y tener con ello una mejor captación y almacenamiento de humedad, y en algunos casos la inversión de la capa arable mejora el control de maleza y plagas (Hunt 1986). Cuando la labor se realiza con arado de discos (LAD), se incorporan raíces y residuos de plantas para su ulterior descomposición y conseguir así un incremento de carbono orgánico del suelo (Navarro *et al.*, 2000). Alternativamente, cuando la labor se realiza con multiarado, LM, considerada como una práctica de conservación, se omite la inversión de la capa arable y solamente se dejan los residuos de la cosecha anterior sobre la superficie del suelo como elemento de protección a la acción de los factores erosivos que pueden provocar la lluvia y el viento (Camacho-Tamayo y Rodríguez, 2007).

Reikosky y Lindstrom, (1993) encontraron que al roturar el suelo con arado de vertedera se produce un repentino aumento de la presión parcial de oxígeno hasta la profundidad del arado, lo que genera una rápida oxidación de la materia orgánica que resulta en una pérdida de carbono del suelo de aproximadamente 2 $t \cdot ha^{-1}$, equivalente a 8 t de CO_2.

Carlise *et al.* (2006) examinaron los mecanismos bajo los cuales se da el flujo inicial de CO_2, y constataron que dicho flujo probablemente está más asociado al contenido de humedad que a la temperatura, factores que incluyen a la infiltración por el efecto que tiene sobre el desplazamiento de la atmósfera del suelo, liberando CO_2 acumulado en el espacio poroso.

El laboreo mecánico del suelo, en cualquiera de sus formas, no siempre funciona como se espera (Conant *et al.*, 2007). Su aplicación excesiva puede provocar deformaciones de la estructura, compactación de las capas subsuperficiales, y cambios en la disponibilidad de humedad en la zona radicular de las plantas cultivadas (González *et al.*, 2004a; González *et al.*, 2004b); además, se alteran los procesos relacionados con los ciclos del carbono (C), lo que trae como consecuencia una disminución en el poder de agregación y en la respiración del suelo, con una mayor susceptibilidad a la erosión (Udawatta *et al.*, 2008a; Udawatta *et al.*,2008b; Watts *et al.*, 2009).

La respiración del suelo es el primer camino por el cual el CO_2 es fijado por las plantas y retorna a la atmósfera, (Schesingler y Andrews, 2000); para reducir dicho retorno ha habido un tendencia en algunos países a utilizar la labranza reducida; sin embargo el impacto de estos cambios de manejo del suelo en el secuestro de carbono permanece

incierto (Houghton *et al.*, 1999; Smaglik, 2000; Johnson *et al.*, 2005). En este sentido, la hipótesis de la presente investigación plantea que la labranza con arado de discos (LAD) o con multiarado (LM) promueve cambios en el sentido del flujo de CO_2, pasando de ser fuente de captura a fuente de liberación permanente después de realizada la labor.

Objetivo

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de dos tipos de la labranza primaria, labranza con multiarado, LM y labranza convencional, LAD, teniendo como referencia un área sin labranza, NL, en la porosidad del suelo, así como en la asimilación y liberación de CO_2 de la capa superior del suelo.

Metodología

Características ecológico-geográficas del área estudiada

El sitio del experimento se ubica en el noreste de México (25° 6.650' N y 100° 59.413' O) en la subprovincia denominada Gran Sierra Plegada, en la parte norte de la Región Fisiográfica Sierra Madre Oriental (Figura 1). El clima es semiárido [BWhw(x')(e)], con una precipitación media anual de 350 mm, de la cual del 80 al 90 porciento cae en verano (García, 1975). Los suelos del lugar están formados principalmente por suelos del tipo Luvisol en un 40 porciento de la superficie total (INEGI, 1976). La vegetación predominante en las parcelas experimentales fue herbácea principalmente compuesta por familias representadas por: *Laminaceas, Chenopodiaceas, Euphorbiaceas y Asteraceas.*

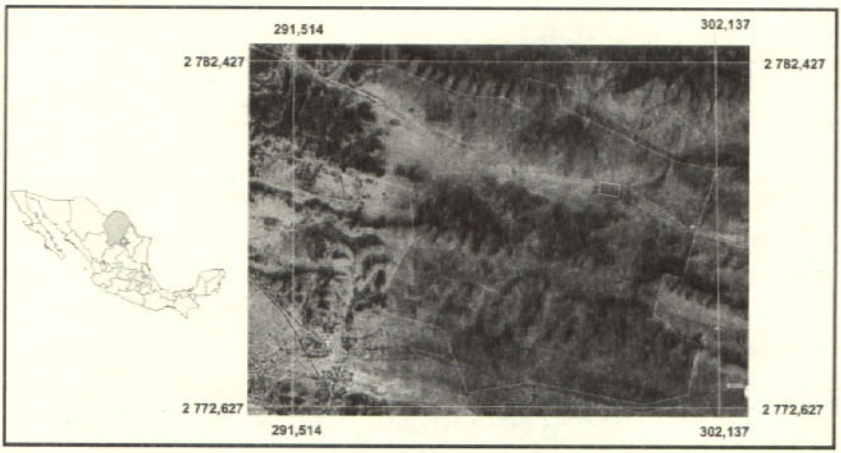


Figura 1. Coordenadas limítrofes en UTM del polígono del Rancho Los Ángeles y ubicación del sitio (en amarillo) donde se instaló la Estación Eddy.

Descripción de las parcelas experimentales

Las mediciones de flujos de CO_2 y vapor de agua se realizaron para cada tratamiento de labranza en parcelas de 3.6 ha cuyas longitudes fueron: 180 m, dirección N-S y 200 m en dirección E-O, ubicadas en el potrero 4 (Figura 1), cuya superficie total es de 35 ha. Este sitio corresponde a un suelo de pastizal convertido a uso agrícola desde hace poco más de 25 años, después de que había permanecido por cinco años consecutivos en descanso en el verano del 2007 nuevamente fue sometido a laboreo.

En el Cuadro 1 se presenta la caracterización del suelo realizada en laboratorio a muestras de los estratos de 0 a 30 y 30 a 60 cm de profundidad.

Cuadro 1. Propiedades físico-químicas más importantes de las parcelas experimentales.

Prof. m	*pH*	*CE (ds/m)*	*% Arcilla*	*% Limo*	*% Arena*	*Da (g/g)*	*Clase textural*	*% Nitróg*	*% M.O*	*% Carb. totales*
0-0.30	*8.28*	*2.1*	*44*	*24*	*32*	*0.9*	*Arcilla*	*0.21*	*4.24*	*37.28*
0.30-0.60	*8.31*	*0.509*	*58*	*28*	*14*	*1.1*	*Arcilla*	*0.14*	*2.8*	*37.77*

Fuente: Laboratorio de Calidad de Agua y Suelo del Dpto. de Riego y Drenaje, UAAAN. pH=potencial hidrógeno; CE= conductividad eléctrica; Da= densidad aparente; M.O. materia orgánica; Carb= carbonatos.

La composición de la vegetación dentro de cada parcela para determinar porcentajes de cobertura se hizo con base en los métodos de intercepción en línea y del cuadrado, propuestos por Franco *et al* (1992). Las especies más importantes se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Flora arvense en las parcelas de monitoreo.

Familia	*Nombre técnico*	*Nombre común*
Laminacea	*Salvia reflexa Hornem*	*Chia*
Bracicaceae	*Eruca sativa Mill.*	*Nabo silvestre*
Asteraceae	*Parthenium hysterophorus L.*	*Cicuitilla anual, altamisa*
Laminacea	*Marrubium vulgare L.*	*Manrrubio*
Asteraceae	*Helianthus laciniathus Gray*	*Polocotillo*
Euphorbiaceae	*Euphorbia furcillata H.B.K.*	*Hierba del coyote*
Laminaceae	*Brickellia laciniata Gray*	*Jarilla*
Chenopodiaceae	*Eurotia lanata (Pursh) Moq.*	*Gordura de invierno*

Diseño general de la investigación

La toma de datos se realizó en la estación de Primavera-Verano (P-V) en 2007 con ciclos de medición de 3 semanas por tratamiento para un total 69 días. La fechas de realización fueron del 22 de Mayo (días del año, dda = 142) al 26 de Junio (dda = 211).

Los ciclos de medición se iniciaron en cada tratamiento una vez realizada la operación de labranza y finalizaron el mismo día que se instalaron los componentes requeridos para medir CO_2 y vapor de agua, así como otros sensores integrados a una Estación micrometeorológica. Los componentes funcionan simultanea e independientemente, cuya descripción se hace más adelante.

Asimismo, según la metodología propuesta por Singh *et al.* (1991), y utilizada ampliamente en estudios de estructura y porosidad del suelo (González, 2004a, González, 2004b; Osuna *et al.*, 2005; Buj y Gisbert, 2007), en el año 2007 se realizó un muestro de suelo para determinar cambios en la porosidad edáfica como consecuencia de la labranza.

Técnicas empleadas

Covarianza Eddy (CE) e instrumentos de medición

El método de la Covarianza Eddy se basa en la medición de los flujos de viento para saber cuantas moléculas son transportadas en los remolinos que se desplazan hacia arriba y hacia abajo dentro de una capa de aire, con lo cual es posible calcular el flujo vertical en un punto dado; de manera que el flujo vertical puede ser presentado como una covarianza de la velocidad vertical del viento y concentración de la entidad de interés (Massman y Lee, 2002; Burba y Anderson, 2007).

En la Figura 2, se ilustran la Estación Eddy (A) y cuatro de sus componentes más importantes empleados: (B) medidor de bióxido de carbono y vapor de agua (Open path gas analyser: modelo LI-7500, LI-COR, al frente) y anemómetro sónico tridimensional (3-D Sonic: modelo CSAT3, Campbell, Sci., Inc. atrás del Open path); (C) radiómetro neto (modelo NR-LITE, Keep and Zonen Inc.); (D) sistema de platos para medir el flujo de calor en el suelo (modelo HFT3, REBS Inc.), dos juegos de termopares para medir temperatura del suelo de cuatro puntas (modelo TCAV, Campbell, Sci., Inc); y (E) sensor para medir temperatura del aire y el vapor de agua (modelo HMP45C, Vaisala, Inc.).

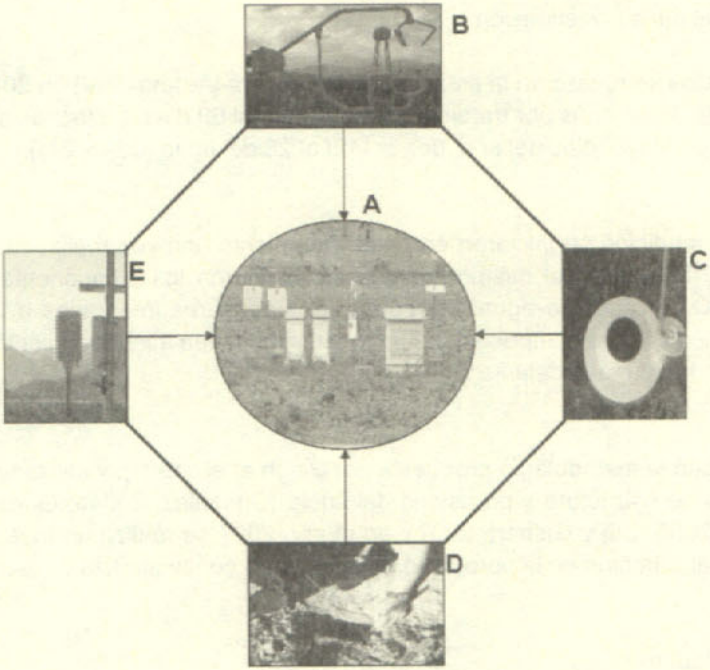


Figura 2. Estación Eddy y componentes principales:

Análisis de imagen

De acuerdo a lo propuesto por Singh *et al.* (1991), la técnica de análisis de imagen consistió en la obtención de muestras en forma de monolitos de 0.15 cm de lado extraídos mediante moldes de cartón rígidos de igual tamaño, y encapsuladas con una película de parafina para evitar su alteración por efecto de la manipulación al momento de ser transportadas.

En la Figura 3 se ilustran cinco etapas de dicha Técnica que van desde el trabajo de campo (a) hasta la obtención de las imágenes binarias (e). Los pasos ilustrados en las 15 imágenes representan lo siguiente: a1 y a2, preparación del monolito y colocación del molde de cartón; a3, aplicación de parafina por los cuatro lados del monolito; b1, cubos de suelo sin la cubierta superior de parafina para promover el secado al aire libre; b2, extracción de la humedad del suelo por medio de una bomba peristáltica que moviliza acetona a través del monolito de suelo; b3, cámara de vacío para propiciar la distribución de la resina epóxica; c1, muestra impregnada con resina; c2, secado en la estufa a 60 °C; c3, secado al aire libre de la muestra impregnada con resina; d1, corte de los cubos para representar las profundidades deseadas; d2, láminas pulidas; d3, sesión fotográfica estereoscópica; e1, imagen con luz natural; e2, imagen con luz UV; e3, imagen binaria sobre la cual se realizan las mediciones.

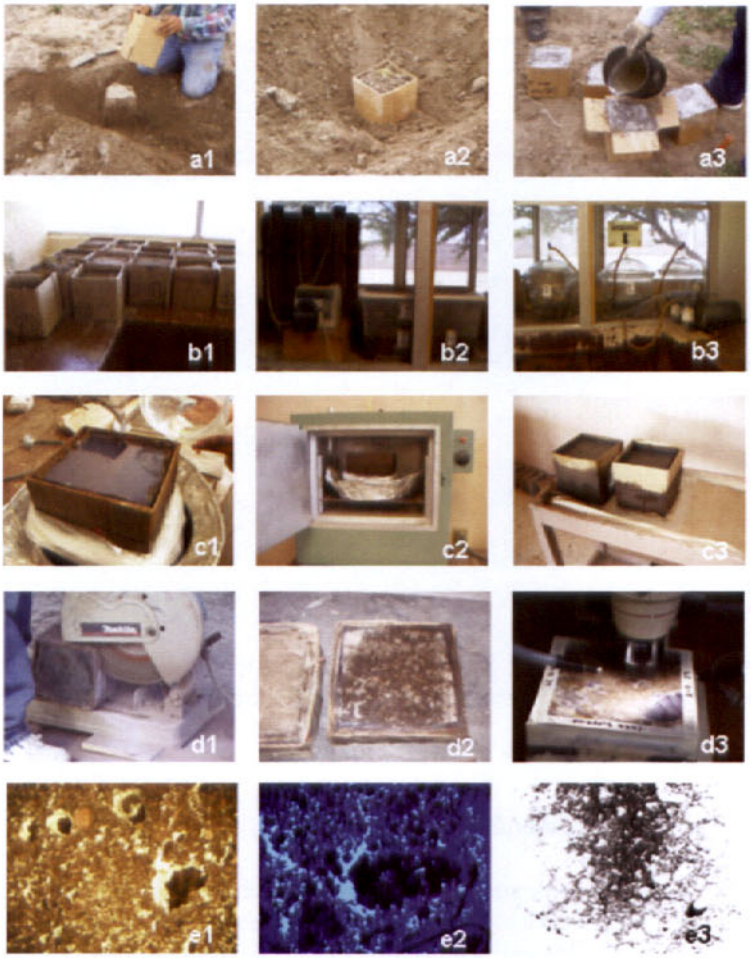


Figura 3. Secuencia gráfica de la Técnica de Imagen para el estudio de la porosidad edáfica.

Métodos de labranza evaluados

Los tratamientos consistieron en el laboreo mecánico del suelo mediante el empleo de un multiarado (LM) y un arado reversible de tres discos, comúnmente empleado en la zona de estudio (LAD). Para LM se utilizó tractor New Holland modelo 6810 de 95 HP, y para LAD se usó un tractor John Deere, modelo 3200 de 84 HP. Ambos, fueron calibrados para trabajar a 0.25 m de profundidad, como se muestra en la Figura 4. El testigo fue el tratamiento de no labranza, NL.

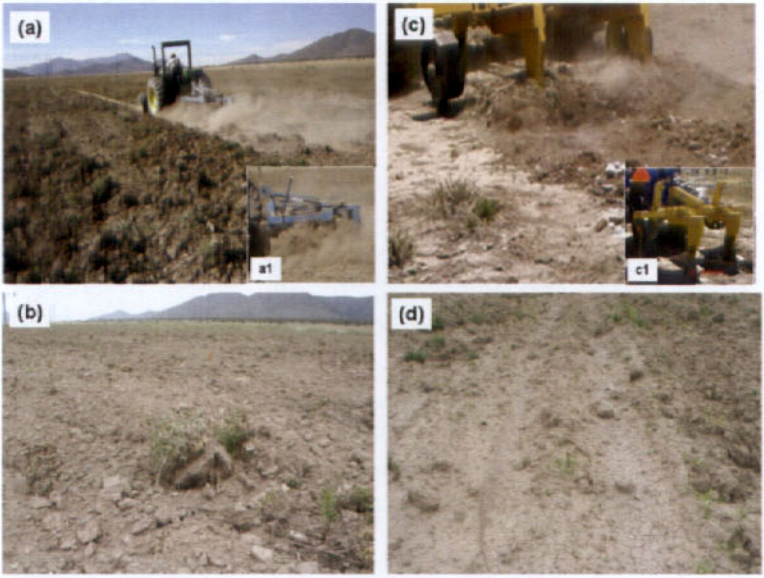


Figura 4. Laboreo del suelo por medio de LAD (a, a1) y LM (c, c1), y efecto sobre la rugosidad de la superficie del suelo y la vegetación ilustrada en (b) y (d), respectivamente.

Variables medidas

Variables de flujo y técnica de análisis

Las variables medidas por los sensores integrados a la Estación Eddy incluyeron lo siguiente: Radiación neta, Rn; Flujo de calor sensible, H; Flujo de calor latente, LE; y Flujo de calor en el suelo, G. Todos estos en $W \cdot m^{-2}$. El CO_2 se midió en $\mu mol\ CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

La frecuencia en las mediciones ejecutadas por los sensores fue establecida a 10 Hz, (10 lecturas por segundo) con promedios cada 20 minutos. La información captada fue almacenada mediante registradores electrónicos que tenían precargados programas para calcular los promedios de las variables antes descritas y sus covarianzas.
La secuencia para la sistematización y las correcciones realizadas, para vapor de agua y bióxido de carbono por efectos de densidad se realizaron de acuerdo a lo propuesto por Webb *et al.*, (1980) y Baldocchi (1994).

Variables porosimétricas y técnica de análisis

Para las variables relacionadas con las propiedades edáficas se midieron: Densidad apa-

rente antes y después de la labranza con base en la técnica del microrrelieve descrita por Cadena *et al.* (2004). Las propiedades porosimétricas comprendieron las siguientes variables: área, forma y distribución de poros.

Las mediciones comprendieron los promedios porcentuales de área, distribución y geometría de poros, tomando como base imágenes JPEG de alto contraste en formato 2272 x 1704 píxeles y de 1.04 MB (megabytes). Posteriormente, las imágenes fueron cargadas en el programa Image Pro Plus 4.5® para su digitalización a partir de una rejilla para cada escala: M1 = 126 x 93 mm; y M2 = 13.5 x 10.1 mm.

El análisis estadístico se realizó para cada profundidad (0.05 y 0.10 m) bajo un diseño de bloques al azar en SAS (SAS, 2006), para lo cual se consideraron como fuentes de variación (Clases) las operaciones de labranza (NL, LM y LAD) y los dos rangos de área de poros (M1 y M2), y como variables de respuesta el área total en porcentaje por tratamiento en ambos rangos. Las comparaciones, tanto para tratamientos como para bloques (M1 y M2) se realizaron mediante la prueba de rango múltiple de Duncan y las diferencias estadísticas fueron declaradas significativas con un valor de $p \leq 0.05$.

Resultados y Discusión

La evaluación del efecto de los dos tipos de la labranza primaria utilizados en la presente investigación (LM y LAD), sobre el flujo de CO_2 (asimilación y liberación) y la pérdida de agua en forma de vapor, se explica primeramente considerando la modificación la estructura del suelo, a la profundidad (0-0.30 m) de trabajo de los implementos antes descritos.

Efecto del laboreo sobre la porosidad en el perfil del suelo

Para el análisis del efecto del laboreo sobre la porosidad edáfica en términos de tamaño, forma y distribución, las escalas consideradas (M1 y M2) se definieron dos rangos: 10 > M1< 2 y 0.1> M2 < 0.02, cuya denominación relativa corresponde a: macroporos y mesoporos, respectivamente; los microporos, visibles solamente con microscopio de barrido electrónico (MBE), no fueron cuantificados, pero se deducen de la porosidad total (Pt), como a continuación se explica.

Medición indirecta de la porosidad total, Pt

La suma de espacios vacíos de diferente tamaño existentes en una masa de suelo es la porosidad total (Pt), teóricamente se puede estimar entre la diferencia unitaria y la relación Densidad aparente (Da)/Densidad real (Dr); asi Dr [Pt = 1 – (Da/Dr)]; donde Dr se asume con un valor constante igual a 2.65 kg m^{-3} (Eynard *et al.*, 2004).

De acuerdo a lo anterior y con base en la proporción de los cambios observados al realizar mediciones sobre el relieve del terreno, antes y después de la labranza, los valores de densidad aparente inicial y final (Da_{in} y Da_{fin}), se calcularon los cambios de Pt ($Pt_{in} \rightarrow Pt_{fin}$)

en las parcelas sometidas al laboreo, teniendo como referencia al tratamiento NL, como se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Densidad aparente y porosidad total, inicial y final por tratamiento.

	Densidad aparente por estrato				*Porosidad total por estrato*			
Trat.	*0.05*	*0.10*	*0.20*	*0.25*	*0.05*	*0.10*	*0.20*	*0.25*
	---------- Da_{in} *en Kg·m^{-3}* ----------				---------- Pt_{in} *en %* ----------			
NL	*904*	*923*	*816*	*955*	*65.8*	*65.1*	*69.2*	*63.9*
LM	*916*	*863*	*956*	*973*	*65.4*	*67.4*	*63.9*	*63.3*
LAD	*973*	*939*	*915*	*915*	*63.3*	*64.6*	*65.5*	*65.5*
	---------- Da_{fin} *en Kg·m^{-3}* ----------				---------- Pt_{fin} *en %* ----------			
NL	*904*	*923*	*816*	*955*	*65.8*	*65.1*	*69.2*	*63.9*
LM	*905*	*852*	*944*	*961*	*65.8*	*67.8*	*64.4*	*63.7*
LAD	*921*	*888*	*866*	*866*	*65.2*	*66.5*	*67.3*	*67.3*

Es evidente que la porosidad total (Pt) cambia en la misma proporción que la densidad aparente (Da), como en este caso que la rugosidad de la superficie del suelo laborado tuvo cambios sobre Da con valores equivalentes a 1.26 y 5.38 % para LM y LAD, respectivamente. Valores de cambio en Da muy cercanos a los reportados por Azooz *et al* (1996) para un suelo franco limoso con 1.6 % y otro franco arenoso con 0.72 %, en los que ambos habían sido laborados con arado de discos

Superficie y distribución de la porosidad en el perfil

Los porcentajes de la superficie que ocupa los poros, así como su distribución a lo largo del perfil para NL, LM y LAD para macro (M1) y mesoporos (M2) se muestran en la Figura 5 (5a, 5b, 5c). Las características para cada tratamiento son las siguientes:

Porosidad en el tratamiento testigo (NL): Es importante aclarar que para NL solo se pudieron procesar datos que representan las profundidades 0.05 y 0.10 m. No obstante, la descripción de su comportamiento se ilustra en la Figura 3a. La porosidad que fue medida en ambas escalas de los 0.05 a los 0.10 m de profundidad pasó de 35.85 a 28.91 %; siendo M2 3.3 y 2.9 veces más grande que M1 para la primera y segunda profundidad, respectivamente. Es decir, mientras que M1 a 0.05 m de profundidad ocupa una superficie equivalente a 8.26 % en M2 es de 27.59; en tanto que a 0.10 m de profundidad M1 es 7.41 % y en M2 es de 21.50 %.

Porosidad en el tratamiento labranza vertical (LM).- En la Figura 5b se observa una tendencia decreciente de la porosidad (M1 + M2) desde la primera profundidad, cuyos porcentajes son: 25.92, 24.85, 25.21 y 21.35 para 0.05, 0.10, 0.20 y 0.25 m de profundidad,

respectivamente. Aunque, al igual que en el caso anterior, los mayores valores corresponden a M2 y son 4.0, 3.4, 3.1 y 2.0 veces mayores que en M1, ya que los valores en cada una de las profundidades para M2 son 20.69, 19.25, 19.05 y 14.27 %, mientras que para M1 son 5.22, 5.60, 6.16 y 7.07 % respectivamente.

Porosidad en el tratamiento de labranza convencional (LAD): a diferencia de los dos tratamientos antes descritos, la suma M1 + M2 de la porosidad en LAD tiene un comportamiento ascendente de 23.64, 27.80, 28.75 y 26.59 % para las cuatro profundidades en el orden anteriormente indicado, siendo dichos valores para M2 de 5.2, 2.6, 2.6 y 2.9 veces mayores que en M1. Los valores para M2 son: 19.85, 20.15, 20.77 y 19.76 %, mientras que para M1 son: 3.8, 7.66, 7.98 y 6.83 % respectivamente (Figura 5c).

En estudios similares se han encontrado las mayores diferencias estadísticas a 0.10 m de profundidad (Udawatta *et al.*, 2008a); es a esta profundidad a la que se considera el mayor intercambio de flujos de masa y energía entre el suelo y la atmósfera detectados con el método de la Covariaza Eddy (Baldocchi *et al.*, 1994).

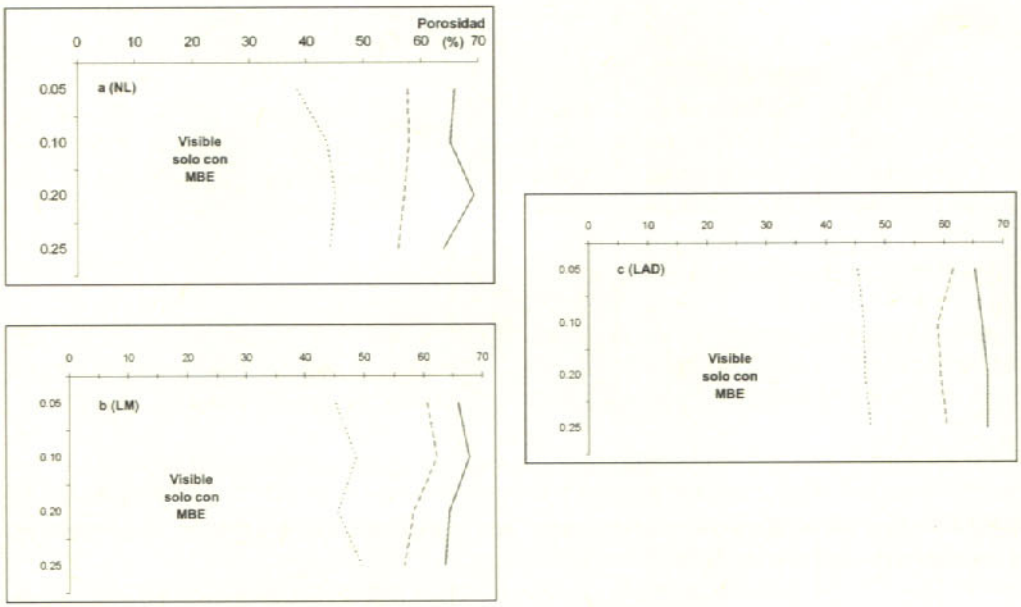


Figura 5. Perfil de porosidad (en porcentaje) en las escalas M1 y M2 para (a) NL, (b) LM y (c) LAD.

Impacto sobre la geometría de poros

En la Figura 6 se ilustra la geometría de poros (redondos, alargados e irregulares) en términos

del área total analizada para cada tratamiento a 0.05 y 0.10 m de profundidad. La información mostrada gráficamente confirma lo mencionado por Kung *et al.*, (2005) en el sentido de que los suelos tienen un espectro de poros con radio generalmente entre 10^{-3} y 10^{-7}m y que la labranza de manera inmediata únicamente afecta aquellos poros cuyo radio es de alrededor 10^{-3}m.
En este caso, NL presenta una porosidad natural donde la presencia de macroporos, en el rango de 2 a 10, y superiores a 10 mm^2 es muy baja; pues la presencia de mesoporos es 2.34 y 1.9 veces mayor que los macroporos; lo cual coincide con las características edáficas ya descritas (Cuadros 1 y 3). Se determinó con base en el triángulo de texturas, que para la clase textural denominada: "Arcilla en agregados" la densidad aparente, se encuentra en el rango de 900 a 1,100 kg m^{-3} (Narro, 1994).

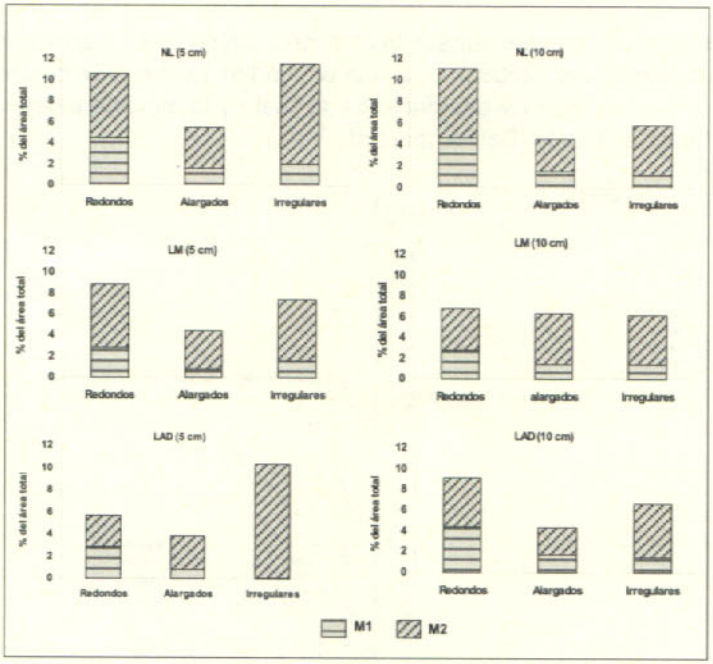


Figura 6. Geometría de poros por tratamiento (NL, LM y LAD) a 0.05 y 0.10 m de profundidad para macro (M1) y mesoporos (M2).

El impacto de la labranza se concentró en el rango de poros predominantes, pero se observan comportamientos diferenciados con tendencia a la deformación de la estructura por tipo de forma en las dos profundidades analizadas:

A 0.05 m de profundidad los cambios para las tres formas de poros se comportan de la siguiente manera: i) Los poros redondos disminuyen su presencia al pasar de 6 porciento en NL a 5.97 y 2.76 % en LM y LAD, respectivamente; ii) los poros alargados pasan de 3.85 en NL a 3.67 y

3.02 % en LM y LAD, respectivamente; y iii) Los poros irregulares pasan de 9.49 en NL a 5.83 y 10.27 %, en LM y LAD, respectivamente.
A 0.10 m de profundidad los cambios para las tres formas de poros se comportan de la siguiente manera: i) Los poros redondos disminuyen su presencia al pasar de 6.45 en NL a 3.97 y 4.72 % en LM y LAD, respectivamente; ii) los poros alargados pasan de 3.07 en NL a 4.88 y 2.58 % en LM y LAD, respectivamente; y iii) Los poros irregulares pasan de 4.57 en NL a 4.8 y 5.19 %, en LM y LAD, respectivamente.

Derivado de la porosidad natural del suelo, desde la formación de bioporos, por la penetración de raíces asociado con la compresión de materiales que las rodean, como la proporción de arcilla presente (superior a 40%), materia orgánica (superior a 5.0 %), y por la presencia de carbonatos (superior a 37 %), son factores fundamentales en el desarrollo de la red de poros en el suelo (Katsvairo *et al.*, 2002; Causarano, *et al.,* 2008).

Los resultados obtenidos son consistentes con lo encontrado por otros autores (Azooz *et al.,* 1996; Eynard *et al.,* 2004) en el sentido de que el manejo agrícola afecta a la distribución del tamaño de poros, así como su continuidad y tortuosidad. La geometría del espacio poroso determina el transporte de agua, nutrientes, oxigeno, así como nutrientes a los micrositios ocupados por microbios y de aquí a las reacciones bioquímicas (Peth *et al.*, 2008).

Finalmente, es importante mencionar que en los estudios de porosidad suele ser complicado demostrar diferencias estadísticas (Singh *et al.,* 1991; Eynard *et al.*, 2004; Udawatta *et al.,* 2008a), como en este caso que solo a 0.05 m de profundidad hay diferencia estadística entre NL y los tratamientos de labranza, ya que en los tratamientos de LM y LAD, la porosidad es estadísticamente similar (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resultados del ANOVA para el área total de poros en las dos escalas (M1+M2) por tratamiento

	Profundidad en m	
Tratamiento.	*0.05*	*0.10*
	----------%----------	
NL	*13.8 a*	*10.75 a*
LM	*10.345 b*	*9.625 a*
LAD	*9.925 b*	*10.075 a*

Nota: Medias con la misma letra no son significativamente diferentes

Efecto de la labranza en la dinámica de CO_2

El presente análisis se centra en términos del comportamiento dinámico del CO_2 a lo largo de las mediciones realizadas sobre dos tipos de superficie: 1) la compuesta por la vegetación donde se sitúo

al tratamiento testigo; y 2) sobre el suelo que fue labrado con los dos tipos de implementos mecánicos antes descritos (Figura 4).

Comportamiento del CO_2: escenarios de emisión y pérdida de Carbono

El análisis dinámico del CO_2 se basa en 21 días seleccionados, por corresponder a segmentos de flujo de viento horizontal en el dominio (180°) del sensor (Open Path gas analyser), de los 69 que duró la medición (142-211). De modo que esto permitió distinguir los cambios en el comportamiento del CO_2 como consecuencia de la labranza (Figura 7).

En la primera etapa de medición realizada sobre el tratamiento sin labranza, NL (142-155), según se puede ver en las Figuras 3a y 3b, tiene como característica primordial la asimilación diurna y liberación nocturna de CO_2. El primero, como resultado fundamental del proceso fotosintético que realizan los organismos autótrofos (organismos capaces de sintetizar sus propios alimentos mediante fotosíntesis o quimiosíntesis), y el segundo, como el producto de respiración que comprende a la planta (parte aérea y raíces) y la acción de los microorganismos que actúan en la descomposición de la materia orgánica del suelo (Scow, 1999; Pumpanen *et al.*, 2003); procesos que dependen fundamentalmente de la temperatura y la disponibilidad de agua (Mandigan *et al.*, 2004).

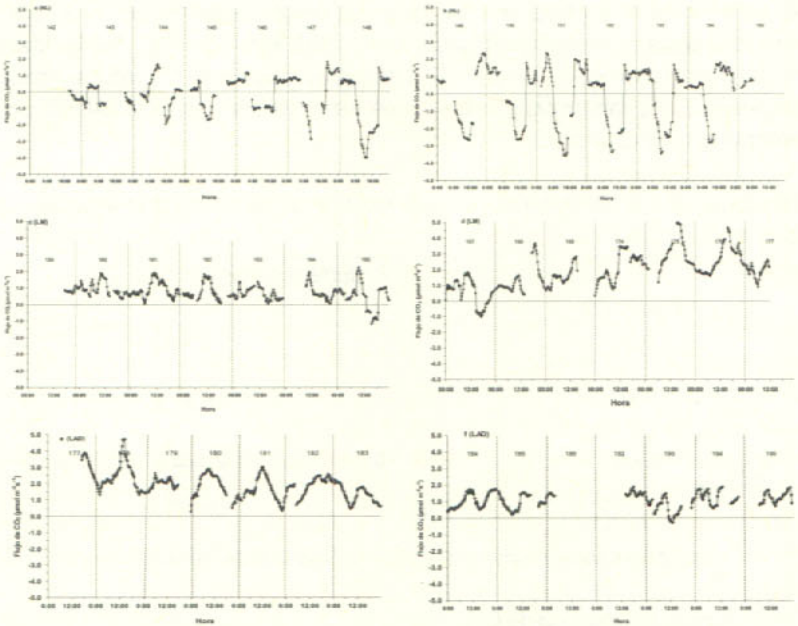


Figura 7. Dinámica de flujo de CO_2 (µmol $m^{-2}s^{-1}$), a partir de los valores instantáneos corregidos para 14 días, indicados entre las líneas verticales punteadas, del 2007 por tratamiento: NL (a-b); LM (c-d); y LAD (e y f). Valores negativos indican asimilación y positivos liberación de CO_2.

Aunque también se observaron excepciones en la dinámica antes descrita para NL, debido a la presencia de asimilación nocturna como los eventos ocurridos en los días 142, 143 y 144 con tasas promedio de -0.470 (19:40-2:20), -0.608 (20:40-1:00) y -0.273 (4:00-7:20) µmol de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, respectivamente.

El comportamiento es aparentemente contradictorio con el ciclo de captura-liberación antes mencionado; sin embargo, esto es posible bajo condiciones críticas de humedad en el suelo y altas temperaturas (Hsiao y Jackson, 1999; Lüttge, 2004) como los contenido gravimétricos (Θ) de humedad registrados en estos mismos días que fueron cuatro veces inferiores a la mas alta registrada en este sitio (0.14275/ 0.03625= 4).

Además de lo anterior, es importante mencionar que algunas especies tienen la capacidad de cambiar temporalmente sus hábitos metabólicos, debido a ciertas condiciones de salinidad o presión de agua, equiparable al proceso CAM (metabolismo del ácido crasuláceo), característico de ciertas especies de plantas de algunas familias como: *Cactaceae, Agavaceae, Lilaceae, y Crassulaceae*, entre otras (Lüttge, 2004; Lira, 2007).

La mayor parte de las tasas instantáneas diurnas registradas para NL entre las 8:20 y las 19:00 horas promediaron -1.634 µmol de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, con extremos máximo y mínimo de -2.391 y -0.668 µmol de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, respectivamente. Mientras que para las nocturnas de las 19:20 a la 8:00 horas la tasa promedio fue de 0.737 µmol de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, en este caso, con extremos máximo y mínimo de 2.351 y 0.011 µmol de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, respectivamente.

Con los datos así analizados no hay manera de determinar el flujo neto de CO_2, debido a que los segmentos de medición no corresponden a días completos; sin embargo, bajo un escenario donde se consideren los promedios antes mencionados (diurno= -1.634 y nocturno = 0.737 µmol de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) a razón de 11.66 h (8:20-19:00) del periodo evaluado, estos serían equivalentes a una captura y liberación de 3.019 y 0.954 g CO_2 $m^{-2}d^{-1}$ respectivamente; lo cual evidentemente ubica al sistema como una fuente de captura de CO_2.

El comportamiento de flujo de CO_2, en ambos tratamientos pone de manifiesto el efecto de la labranza realizada el 8 de junio (dda159) para el tratamiento LM y el 26 de Junio (dda 177) para el tratamiento LAD; En los dos casos, el sistema de laboreo pasa de ser fuente de captura neta a fuente de liberación permanente de CO_2.
Las mediciones analizadas en el tratamiento de labranza con multiarado, LM, para los 7 días elegidos (159-177) alcanzaron un promedio de emisión de 1.296 µmol de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ con extremos máximo y mínimo de 2.244 y 0.524 µmol de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. En tanto que para LAD el promedio fue de 1.387 µmol de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, con extremos máximo y mínimo de 2.11 y 0.664 µmol de $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

Los promedios antes citados podrían ser equivalentes a emisiones de CO_2 de 4.605 y 2.371 g $m^{-2}d^{-1}$ para LM y LAD, respectivamente; valores cercanos a los reportados por otros autores que midieron la respiración del suelo en el mes de Julio (6 g CO_2 $m^{-2}d^{-1}$) mediante el uso

de una cámara opaca de intercambio gaseoso estacionaria (Qi *et al.*, 2007).

Bajo las condiciones y escenarios descritos LM promovió una pérdida diaria de C orgánico del suelo de 12.4 $Kg \cdot ha^{-1}$, mientras que en LAD la pérdida fue de 6.4 $Kg \cdot ha^{-1}$.

Relación entre las propiedades físicas del suelo y la dinámica de CO_2

El efecto del laboreo del suelo sobre las propiedades físicas del suelo se ha documentado extensamente (González, 2004a; González, 2004b; Osuna *et al.*, 2005; Buj y Gisbert, 2007), permitiendo con ello, entre otras cosas, caracterizar su funcionamiento.

En este caso, los mesoporos con diámetros entre 0.1 y 0.02 mm, que fueron mayormente afectados por la labranza (LM superior a LAD), corresponde a los diámetros de raíces de cereales (>0.1mm) y pelos absorbentes de especies dicotiledóneas con diámetros entre 0.005 a 0.01 mm; lo cual, también permitió el drenado de agua y la entrada de aire.

Bajo esas condiciones los contenidos gravimétricos (Θ_w) de humedad promedio por tratamiento fueron: para NL= 0.06279; LM = 0.0516; y LAD = 0.0668; pero aunque LAD incrementa su capacidad de almacenamiento de humedad, probablemente es retenida con menos fuerza; como en el caso que mencionan Moroizumi y Horino, (2004) en un experimento donde se comparó el efecto de la labranza con arado de discos (LC) y no labranza (NL).

En este caso, se observa que LM con un área 10.345 % del total de poros del suelo y una Θw promedio de 0.0516 menor a LAD, potencialmente tiene una emisión de 4.6 g de CO2 $m^{-2}\ d^{-1}$, equivalente a una pérdida de carbono orgánico del suelo (COS) de 1.24 g m^{-2}; resultados y condiciones por cierto muy parecidas a la reportadas por Raich y Mora (2005) para un suelo Franco Arcilloso con materia orgánica entre 3.24 y 3.31 %, y emisiones promedio de 4.8 g $CO_2\ m^{-2}d^{-1}$.

La labranza acelera la oxidación del carbono orgánico (CO) a CO_2, mediante una mayor entrada de aire a la capa de suelo, proceso que es regulado naturalmente por la temperatura y el contenido de humedad (Curtin *et al.*, 2000). En este caso, si LM tiene una emisión estimada de CO_2 a casi el doble de lo que ocurrió con LAD (4.605/2.371=1.9) probablemente se debe a dos circunstancias:

Primero, el movimiento de suelo en ambos casos produce una presión parcial de aire sobre la atmósfera de suelo (Reikosky y Lindstrom, (1993); en este caso, es evidente que en LM hubo mayor entrada de aire comparado con LAD, pues los valores de densidad aparente (Da) inicial y final a 0.10 m de profundidad así lo indican (Cuadro 3).

Segundo, los niveles de CO en el suelo, fundamentalmente está determinado por el balance entre las entradas y las salidas. La primera a partir de los residuos de plantas, raíces, y exudados de raíces; la segunda, por las pérdidas de materia orgánica debido a la descomposición, erosión y lixiviación (Six *et al.*, 2006). En este caso, aunque no se midió la bio-

masa (para determinar la aportación al suelo) presente antes de la labranza, es importante considerar que mientras en LM la vegetación queda en la superficie en LAD la vegetación es mezclada en el perfil del suelo. Todo parece indicar que la condición en que quedó la vegetación en LM favoreció una oxidación del Carbono orgánico más acelerada.

Por último, las comunidades microbianas son reguladoras clave en la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOS) y la disponibilidad de nutrientes, los cambios en su función y composición es una respuesta a las diferentes prácticas de manejo del suelo, lo cual juega un papel importante en las tasas de pérdida de Carbono orgánico del suelo (McCulley y Burke, 2004; Six *et al.*, 2006); en este caso, LM favorece más la acción de hongos, y LM la de bacterias que actúan sobre la materia orgánica recalcitrante, la cual es responsable de los procesos de agregación del suelo.

Conclusiones

Aunque los cambios en la porosidad por efecto de la labranza no son fáciles de demostrar estadísticamente, en este caso quedó claro que al menos sobre la superficie de intercambio entre el suelo y la atmósfera, LM tiene un mayor impacto que LAD sobre el rango de poros que determinan el funcionamiento hidrodinámico del suelo.

La geometría de los poros observada en cada tratamiento, tiene funciones distintas, ya que para NL las tres formas analizadas (redondos, alargados e irregulares) están asociadas al desarrollo radicular y al funcionamiento de la rizósfera, mientras que para LM y LAD, al menos las formas alargadas e irregulares tienen que ver con la deformación de la estructura que se manifiesta en cambios importantes en la continuidad y tortuosidad en el transporte de aire y agua.

Por lo tanto, el comportamiento del CO_2 para NL corresponde al funcionamiento bruto del sistema, por ejemplo, para el caso de la respiración (emisión de CO_2) en este caso implica la suma de las aportaciones de microorganismos y la planta (raíz y parte aérea); mientras que para LM y LAD, las mediciones corresponden a la respiración del suelo.

De acuerdo a las tasas de emisión de CO_2 y su equivalente de pérdida de Carbono orgánico del suelo, LM podría ser una práctica de labranza primaria riesgosa comparada con LAD, si esta no se acompaña por un sistema de manejo de residuos para incrementar la fertilidad del suelo.

Por último, es importante señalar que si bien la presente investigación esta centrada en un lapso de tiempo muy corto y que podría faltar hacerlo sobre un ciclo de cultivo completo, los resultados son relevantes en cuanto a las magnitudes de captura y liberación de CO_2, así como los factores de estrés que provocan cambios en la dinámica de funcionamiento del sistema suelo-planta, tanto los de orden natural como los inducidos por la maquinaria.

Literatura Citada

Azooz R. H., M. A. Arshad, and A. J. Franzluebbers. 1996. Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in Northwestern Canada. Soil Sci. Am. J. 60 (4): 1197-1201.

Baldocchi D. 1994. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C3 (wheat) and an open C4 (corn) crop: II. CO_2 exchange and water efficiency. Agricultural and Forest Meteorology, 67: 291-321.

Buj O., and J. Gisbert. 2007. Cuantificación de la porosidad en areniscas mediante análisis digital de imágenes. Facultad de Ciencias de la Tierra, Departamento de Petrología y Geoquímica. Geogaceta (41): 35-38.

Burba G. and Anderson D. 2007. Introduction to The Eddy Covariance Method: General Guidelines, and Conventional Workflow. LI-COR Biosciences: 4467 Superior Steet P.O. Box 4425, Lincoln Nebraska 68504, USA. Revisado (13/04/09) In: http://www.licor.com/env/PDF/EddyCovariance_readonly.pdf

Cadena, Z M., G. T. Muñiz y G. A. Zermeño. 2004. Desempeño de Implementos en Términos de Consumo de Energía y Calidad de Trabajo. Agraria Nueva Época. I (3):12-18

Camacho-Tamayo J. y A. G. Rodríguez. 2007. Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua en el suelo. Agricultura Técnica (Chile). 67 (1): 60-67.

Carlise E. A., Steenwerth K. L. y Smart D. R. 2006. Effects of land use on soil respiration: conversion of oak woodland to vineyards. J. Environ. Qual. 35: 1396-1404.

Causarano H., A. J. Franzluebbers, J. N. Shaw, D. W. Reeves, and R. L. Raper. 2008. Soil organic carbon fractions and aggregation in the southern Piedmont and Costal Plain. SSSAJ, 72 (1): 221-230.

Conant R., M. Easter, K. Paustian, A. Swan and S. Williams, 2007. Impacts of periodic tillage on soil C stocks: a synthesis. Soil Tillage Research 95: 1-10.

Curtin, C., Kelt D., Frey T. & Brown J., 2000. On the role of small mammals in mediating biotic and abiotic interactions in structuring Southwestern communities and landscapes. Ecology Letters 3: 309-317.

Eynard A., T. E. Schumacher, M. J. Lindstrom, and D. D. Malo. 2004. Porosity and pore-size distribution in cultivated Ustolls and Usters. Soil Sci. Soc. Am. J. 68 (6): 1927-1934.

Franco L. J., G. C. Agüero, A. G. Cruz, A. R. Rocha, N. S. Navarrete, G. M. Flores, et al 1995. Manual

de Eocología. Reim. 1992. Ed. Trillas. P 266.

García E. 1975. Climas Coahuila y Nuevo León, precipitación y probabilidad de lluvia en la República Mexicana y su evolución. CETENAL, México, D.F.

González, C. G., I. Sánchez-Cohen, y D. García-Arellano. 2004a. Relaciones entre el manejo del huerto de nogal y la porosidad del suelo. Terra Latino. (22): 279-287.

González, C. G., I. Sánchez-Cohen, y J. P. Rossignol. 2004b. Morfología de poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. Ing. Hidráulica Méx. XIX (3): 15-23.

Hsiao T. C. and R. B. Jackson, 1999. Interactive Effect of Water Stress and Elevated CO2 on Growth, Photosynthesis, and Water Use Efficience. Cap. 1 (Pp 3-31) on Carbon dioxide and environmental stress. Edited By Yiqui Luo and Harold A. Mooney. Scsfemic Press. P 418.

Houghton, R.A., Hackler, J.L. y Lawrence, K.T. 1999. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. Science 285: 574-578.

Hunt D. 1986. Maquinaria Agrícola: Rendimiento económico, costos, operaciones, potencia y selección de equipo. Manual de laboratorio y de trabajo. Trad. Farm Power and Machinery Managment. 1ª. Reimp. en Español. Ed. Limusa. México, D.F. Pp 435.

INEGI, 1976. Cartografía de los temas: Edafológica, Geológica, Topográfica y Vegetación y Uso del Suelo. Cubrimiento: Agua Nueva (G14-C43) y Huachichil (G14-C44). Escala 1:50,000.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Climate change impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report.

Johnson J.F.M., D.C. Reicosky, R.R. Allmaras, T.J. Sauer, R.T. Venterea and C.J. Dell, 2005. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agriculture in the central USA. Soil and Tillage Research 83: 73-94.

KatsvairoT., W. J. Cox and H. V. Es. 2002. Tillage and rotation effects on soil physical characteristics. Agron. J. 94 (2): 299-304.

Kung K. J., M. Hanke, C.S. Helling, E. J. Kladivko, T. J. Gish, T.S. Steenhuis, and D. B. Jaynes. 2005. Quantifying pore-size spectrum of macropore-type preferential pathways. Soil Sci. Soc. Am. J. 69 (4): 1196-1208.

Lira R. H. S. 2007. Fisiología Vegetal. 2da. Ed. Editorial Trillas. Impreso en México. P 237.

Lokupitiya E. and K. Paustian. 2006. Agriculture soil greenhouse gas emissions: a review of national inventory methods. J. Environ. Qual. 35: 1413-1427.

Lüttge U. 2004 Ecophysiology of crassulacean acid metabolism (CAM). Annals of Botany 93: 629-652. In: www.aob.oupjournals.org

Mandigan M. T., Martinko J. M. y Parker J. 2004. Brock. Biology of microorganism. Ed. en español, Brock. Biología de los Microorganismos, 10° ed. Ed. Pearson Prentice Hall. Impreso en España. 963 p.

Massman W. J. y Lee, X. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. Agriculture and Forest Meteorology (113): 121-144.

McCulley R. L. and I. C. Burke. 2004. Microbial community composition across the Great Plains: landscape versus regional variability. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 106-115.

Moroizumi T. and H. Horino. 2004. Tillage effects on subsurface drainage. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 1138-1144.

Narro, E. 1994. Física de Suelos con Enfoque Agrícola. 1ra ed. Ed. Trillas-UAAAN. Impreso en México, D.F. P50.

Navarro B. A., B. S. Figueroa, V. M. Ch. Ordaz, y F. V. C. González. 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. Terra vol. 18 (1): 61-69.

Osuna, C. E. S., S. B. Figueroa, C. Oleschko, D. M. de L. Flores, M. R Martínez, y C. F. V. González. 2005. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. Agrociencia 40: 27-38.

Peth S., R. R. Horn, F. Beckmann, T. Donath, J. Fischer and A. J. M. Smucker, 2008. Intra-aggregate pore-sapce features using synchrotron-radiation-based microtomography. Soil Sci. Soc. Am. J. 72: 879-907.

Pumpanen J, Ilvesniemi H, Hari P. 2003. A process Based Model Predicting Soil Carbon Dioxide Efflux and Concentrations. Soil Sci. Soc. Am. J. 67: 402-413.

Qi Y. Ch, Y. Dong, J. Liu, M. Domroes, Y. Geng, L. Liu, et al. 2007. Effect of the Conversion of Grassland to Spring Wheat Field on the CO2 Emission Characteristics in Inner Mongolia, China. Soil and Tillage Research, 94: 310-320.

Raich J. W. y Mora G. 2005. Estimating root plus rhizosphere contributions to sol respiration in annual Croplands. Soil Sci. Soc. Am. J. 69: 634-639.

Reikosky, D.C. and Lindstrom, M.J. 1993. Effect of fall tillage method on short term carbon dioxide flux from soil . Agron. J. 85:1237-1243.

SAS, Institute, 2006. SAS 0.13 User´s Guide. Statistics. SAS Inst. Cary NC, US.

Schlesinger W and J Andrews. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry 48:7-20.

Scow, M. K. 1999. Soil Microbial Communities and Carbon Flow in Agroecosistems. Ed. Academic Press, Editado por Jakson, L. E. Carolina University, USA.: 367-413.

Singh P., S. R. Kanwar, and L. T. Thompson. 1991. Macropore characterization for two tillage systems using resin-impregnation technique. Soil Sci. Soc. Am. J. (55): 1674-1679.

Six J., S. D. Frey, R. K. Thiet and K.M. Batten. 2006. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in agroecosystems. Soil Sci. Soc. Am. J. 70: 555-569.

Smaglik, P. 2000. United States backs soil strategy in fight against global warming. Nature 406: 549-550.

Udawatta R. P, S. H. Anderson, C. J. Gantzer, and H. E. Garret. 2008a. Influence of Praire Restoration on CT-measured Soil Pore Characteristics. J. Environ. Qual. 37: 219-228.

Udawatta R. P., C. J. Gantzer, S. H. Anderson, and H. E. Garrett. 2008b. Agroforestry and grass buffer effects on pore characteristics measured by high-resolution X-ray computed tomography. SSSAJ 72 (2): 295-304.

Watts D. B., K. E. Smith, T. R. Way, H. A. Torbert, and S. A Prior. 2009. Tillage and Frtilizar applications practices effects on greenhouse gas flux (CO2, CH4 and N2O) nad yield en a corn cropping system. ISTRO 18th Triennial Conference Proceedings, June 15-19 Izmir, Turkey. T8-004: 1-13.

Webb, E. K., G. I. Pearman and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. Quart. J. Roy Meteorol. Soc. 106: 85-100.

CAPITULO 5

Impacto biológico de las sequías: caso del sitio LTER Mapimí, Durango

Víctor Manuel Reyes Gómez, Jorge López Portillo, Lucina Hernández, Karina Grajales, Daniel Núñez López

Instituto de Ecología. A.C.

Índice

Resumen
Abstract
Introducción
Objetivo
Materiales y métodos
    Área de estudio
    Suelo y superficie encostrada
    Calculo del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)
Resultados y discusión
    Cubierta edafológica
    La superficie del suelo
    Costras predominantes
    Especies de criptógamas
    Régimen pluviométrico mensual y anual
    Evolución de la cobertura de costras biológicas
    Efecto de la sequía sobre la presencia de costras biológicas
Conclusiones
Literatura citada

Resumen

Para evaluar el impacto de la sequía sobre algunos componentes biológicos de ecosistemas áridos del norte de México, en el sitio LTER- Mapimí, desde 1996, se comenzó a registrar dos veces por año, la variación de la cobertura de costras biológicas que recubren el suelo de un pastizal de toboso (*Pleuraphis mutica*) y de un matorral compuesto principalmente de gobernadora (*Larrea tridentata*), de mezquite (*Prosopis glandulosa*) y de nopal rastrero (*Opuntia rastrera*), representativos del desierto Chihuahuense. El objetivo fue probar la siguiente hipótesis: en ecosistemas áridos, la cobertura de costras biológicas varía en función de la intensidad de la sequía. El análisis consistió en confrontar los datos de cobertura de costras biológicas, a los valores estacionales de lluvia y del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) calculados para el periodo 1996 a 2005. Se constató que tanto en pastizal como en matorral existe un mayor impacto de la sequía sobre la presencia de costras, cuando se consideran la lluvia o el SPI de años hidrológicos. En pastizal, tanto en marzo como en noviembre, en años hidrológicos se presentaron las regresiones más significativas (respectivamente $r2 = 0.74$ $p<0.01$; $r2 = 0.63$, $p<0.01$) seguidos de la lluvia estival ($r2 = 0.53$ $p< 0.02$, 0.36, $p<0.05$). De la misma manera, en matorral, las lluvias anuales de noviembre tienen un mayor efecto a corto plazo ($r2 = 0.38$, $p<0.02$), seguido de las lluvias estivales ($r2 = 0.36$, $p<0.05$). En el caso de efectos acumulados de los déficits de lluvia, los modelos más significativos fueron para los valores del SPI12 de noviembre y del SPI5 de octubre, respectivamente, año hidrológico y periodo estival. En pastizal, la costra biológica se ve más impactada por los valores del SPI12, seguido de los valores del SPI5 (respectivamente, $r2 = 0.65$, $p<0.01$; $r2 = 0.38$, $p<0.05$); de igual forma para matorral, los valores del SPI12 explican más la presencia de costras que los del SPI5 (respectivamente, $r2 = 0.36$, $p<0.1$; No significativo). Si se comparan las dos comunidades, se encontró que la sequía produce un impacto más conspicuo en la zona de pastizal que en matorral. El método adoptado para el monitoreo ecológico a largo plazo de los cambios de la superficie encostrada por efecto de la sequía, resultó ser eficaz y es extrapolable a cualquier sitio con condiciones similares a Mapimí.

Abstract

For assess the impact of drought on some biological components of ecosystems aggregates of the North of Mexico at the Long Time Ecological Research (LTER)-Mapimí, Durango, site since 1996, began to register twice a year, the variation of the coverage of biological crusts lining the soil of a toboso grassland (*Pleuraphis mutica*) and a shrub composed mainly of cresote (*Larrea tridentata*), mezquite (*Prosopis glandulosa*) and prickly pear (*Opuntia rastrera*) representative of the Chihuahuan desert. The objective was to test the following hypothesis: in arid ecosystems, biological crusts coverage varies in role of the intensity of drought. The analysis was to confront the biological, crusts to the seasonal values of rain coverage data and of the Spatialized Precipitation Index (SPI) calculated for the period 1996 to 2005. It was noted that both in grassland as shrubland there is a

greater impact of drought on the presence of crusts, when considering the rain or hydrological years SPI. In grassland, both in March and in November, in hydrological years were presented the most significant regression (respectively $r^2 = 0.74$ $p < 0.01$; r2 =) 0.01) (0.63, p < followed summer rain ($r^2 = 50$ g $p < 0.02$, 0.36,) ($p < 0.05$). Similarly, in scrub, annual rainfall of November have a greater effect short-term ($r^2 = 0.38$, $p < 0.02$), followed in the summer rains ($r^2 = 0.36$, $p < 0.05$). In the case of cumulative effects of rain, the most significant models deficits were for values of the SPI12 November and the SPI5 of October, respectively, hydrological year and summer. In grassland, biological crust is more course by the SPI12, followed by the values of the SPI5 values (respectively, $r^2 = 0.65$) ($p < 0.01$; $r^2 = 0.38$, $p < 0.05$). Similarly for shrubs, the values of the SPI12 more explain the presence of crusts to the SPI5 (respectively) ($r^2 = 0.36$, $p < 0.1$; significant no). When comparing the two communities is found that drought produces a more conspicuous impact in the area of grassland that shrub. The method adopted for the ecological monitoring long-term changes the surface crusting effects of drought, proved effective and extrapolated to any site with conditions similar to Mapimí, Durango.

Introducción

La región norte de México se caracteriza por la dominancia de climas secos, la existencia de condiciones de aridez y la inestabilidad en la ocurrencia de lluvias, razón por la cual se consideran como zonas vulnerables a impactos producidos por sequías. Para estudiar la sequía, su duración, intensidad y severidad se han desarrollado varios índices, destacan el de Palmer, el de anomalías de la precipitación, de tendencias hidrológicas y el de precipitación estandarizada (Mckee *et al.*, 1993; Nuñez-López *et al.*, 2007; Reyes-Gómez *et al.*, 2006). El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés), junto con el de Palmer y anomalías están siendo utilizados como sistema de vigilancia de la sequía y sus impactos en norte América por los gobiernos de Canadá, México y E.U.A. Uno de los nuevos índices que se apoyan en la tecnología de satélites, es el conocido como Índice de Condición de Vegetación (VCI, por sus siglas en inglés), es usado para monitorear en tiempo real el estado de la vegetación por efecto de la sequía, usando el grado de reflectancia de la vegetación (Heim, 2000).

La ventaja más importante del uso del SPI, es que requiere solamente de series de datos de lluvia históricos de 30 años continuos, y con el ajuste de la distribución de la probabilidad de lluvia a una función Gama incompleta, se puede validar la duración, intensidad y distribución geográfica de eventos extraordinarios de déficits o excedentes hídricos en una región (Muñoz-Robles, 2006). En la última reunión de Gobernadores Fronterizos E.U. y México, desarrollada en San Diego, Cal. (*Binational Drought Science Conference,* 2009), se presentó una proyección global de la lluvia para el periodo de 2070 – 2100, donde está previsto un déficit pluviométrico de entre -5 y -15 mm de lluvia para México (DWRSC, 2008), que se traducirá en sequías severas. De las conclusiones más importantes de esa reunión, sobresale la necesidad de preservar las redes de observación hidrometeorológica y ecológica a largo plazo, además de expandir la instrumentación y sitios de monitoreo para cubrir una mayor superficie vigilada en la Tierra.

Con la misma intención, surgieron otras redes temáticas y de monitoreo ecológico a largo plazo en México y el mundo, como la LTER (por su siglas en inglés, Long Time Ecological Research) cuyo propósito esencial es abordar de manera interdisciplinaria, el estudio de fenómenos ecológicos a escalas espaciales y temporales amplias; para ello se están desarrollando de forma integral proyectos de investigación estratégicos para responder a preguntas sobre la resiliencia de los ecosistemas de México y ampliar el conocimiento del papel de los ciclos biogeoquímicos y de la biodiversidad en los servicios ecosistémicos de los principales biomas del país (Maass y Equihua, 2008). Uno de los sitios de vigilancia ecológica, que desde hace más de una decena de años se ha integrado a redes de investigación para dar seguimiento a los cambios en estructura, composición y función de ecosistemas áridos del norte de México, es el caso del sitio LTER-Mapimí. Los componentes del ecosistema que se están registrando de forma ininterrumpida en el sitio, versan en cuatro temáticas principales: la variabilidad espacial y temporal de la lluvia, los cambios en la productividad primaria (biodiversidad vegetal, su cobertura y su estructura); el componente edafológico (descripción, calidad orgánica y su cobertura de costras superficiales) y la densidad poblacional de los principales herbívoros de las dos

comunidades vegetales, específicamente de lagomorfos, roedores y ganado bovino (Hernández *et al.* 2005). En otras zonas áridas del mundo, las costras minerales y biológicas están siendo monitoreadas para determinar su relación con la existencia de la cubierta vegetal, de la fauna edáfica y su papel en los ciclos biogeoquímicos del agua, el carbono y el nitrógeno de esos ecosistemas (Casenave y Valentin, 1989; Belnap *et al.*, 2004; Cortina *et al.*, 2006). Las costras biológicas y minerales del suelo son consideradas como un indicador de la dinámica y funciones ambientales de los ecosistemas áridos y semiáridos, visualizando procesos tales como la desertificación, el proceso de erosión por el cambio de uso de suelo y su papel en la expansión de la vegetación (Bowker *et al.*, 2006; Evans, 2003; Reyes-Gómez *et al.*, 2007; Karnieli *et al.*, 2001). Estos registros ecológicos de forma ininterrumpida, son la base científica para demostrar a través de modelos de regresión, el impacto real del cambio climático sobre los ecosistemas del mundo. En particular, en este trabajo se ha acotado la meta científica de demostrar, con diez años de registros de algunos componentes biológicos de ecosistemas de desierto, la hipótesis de que los déficits hídricos vistos a través de los índices como el SPI, son herramientas que permiten evaluar el impacto de la sequía sobre la presencia de costras biológicas que se sabe, contribuyen en el sustento y funcionamiento del ecosistema.

Objetivo

Analizar la relación que guarda la variación espacial y temporal de la sequía con la presencia de costras biológicas que recubren el suelo en dos comunidades de vegetación del sitio LTER-Mapimí.

Materiales y métodos

Área de estudio

El sitio de monitoreo ecológico a largo plazo de Mapimí (LTER-Mapimí) se ubica dentro de la reserva de la biosfera de Mapimí (Figura 1), cuyos vértices del cuadrante de coordenadas geográficas son, superior derecho con 26°42'52.82" N y -103°44'01.61" O, inferior izquierdo con 26°39'45.43" N y -103°47' 36.94" O. Como sistema de vigilancia ecológica, se establecieron dos sitios de monitoreo permanente sobre dos comunidades de vegetación representativas del desierto Chihuahuense. Los criterios de selección fueron el tipo de vegetación, pendiente y geología, mismos criterios empleados en las redes de monitoreo de La Jornada y Sevilleta en Nuevo México, U.S.A. Según la geomorfología del paisaje dada por Breimer (1995), el primer sitio es una zona de Bajada Superior, formada por depósitos de materiales gruesos (piedras, gravas, arenas) que "descansan" sobre Lutita del Terciario; es un matorral de gobernadora (*Larrea tridentata* (DC.) Cov.) asociado principalmente al nopal rastrero (*Opuntia rastrera* F.A.C. Weber). El segundo sitio está en la zona de Bajada Inferior formada de depósitos de material medio y fino (arenas, limos y

arcillas), sobre Lutita del Terciario; el paisaje de esta zona, se ve interrumpido pendiente abajo por lomas de conglomerado; es una comunidad de pastizal organizado en arcos de vegetación compuesto principalmente por el pasto toboso (*Pleuraphis mutica* Buckley) seguido de matorral de *Flourensia cernua* DC., *L. tridentata y Prosopis glandulosa* Torr. var. *Torreyana* (L.D. Benson) M.C. Johnst (García –Arevalo, 2002).

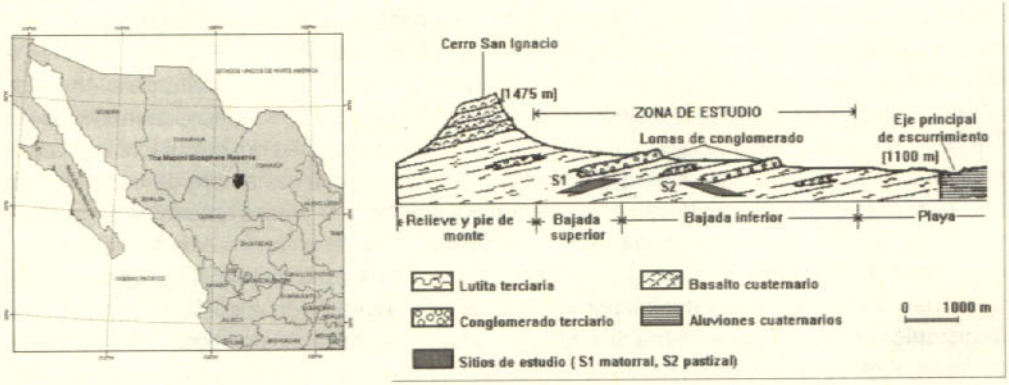


Figura 1. Ubicación geográfica y geología del paisaje de la zona de estudio.

Suelo y superficie encostrada

Se realizaron perfiles edafológicos (0-200 cm) en zonas representativas de Matorral y Pastizal. La superficie mineral del suelo se describió usando la metodología propuesta por Cassenave y Valentin (1989), que contempla elementos de superficie de suelo como rocas, gravas, arena, actividad fáunica (huellas de termiteros, hormigueros y fauna en general), así como una tipología de costras físicas. El porciento de superficie del suelo se consideró a dos escalas: una general, determinada en 1996 al comienzo del monitoreo, sobre una malla de una hectárea de líneas cada 5 m y puntos cada 2 m donde se registran tres elementos: costra, mantillo y vegetación basal. La segunda consistió en un diseño de bloques al azar para las dos comunidades de vegetación; en cada sitio se establecieron 4 bloques con 4 tratamientos que en total suman 16 exclusiones en matorral y 16 en pastizal, cubren una superficie representativa del medio de 8 ha. En cada exclusión de 2500 m^2, sobre 36 cuadrantes fijos de 1 m^2, se realizan mediciones de la cobertura de costras biológicas asociadas a cianobacterias y líquenes, vegetación aérea (altura y cobertura) y rastros de actividad edáfica de fauna (termiteros, hormigueros, arácnidos, lagomorfos, roedores, bovinos). Con estos rangos de área de medición, el estudio resulta apropiado para generar interpretaciones a escala regional y local (García-Pichel y Belnap, 2003). Desde 1996, la frecuencia de mediciones es de 2 veces por año, una en marzo y otra en noviembre, con el propósito de evaluar el efecto de la variación anual e interanual de la precipitación pluvial. En colaboración con Jayne Belnap (Prof. Dr. de US Geological Survey, Forest and Rangeland Ecosystem Science Center, U.S.A.) y a las taxónomas M.R. Peralta y A. G. Avila de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UM-SNH), se han identifi-

cado los principales grupos de criptógamas, aunque por el momento se mide la cobertura por superficie encostrada asociada a criptógamas y no por especie.

Calculo del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

Con datos de precipitación diaria de 30 años, provenientes de la estación del laboratorio de la reserva de la biosfera de Mapimí, ubicada en la zona central del área de estudio, se estimaron las normales mensuales históricas de lluvia para calcular el SPI con el método descrito en Núñez et al. (2007). El valor del SPI se calcula para un mes (SPI1) o hasta para 48 meses (SPI48), representa el déficit o excedente de lluvia en una región dada, considerando los promedios mensuales históricos de un mes atrás, hasta 48 meses atrás del calculado. Los valores de SPI estimados para este análisis fueron para 12 meses, para noviembre de cada año, que representa la sequía o humedad en ese mes considerando los 11 meses anteriores de cada año (Tabla 1). También se calcularon los valores del SPI5 que representan los déficits o excedentes de lluvia del periodo estival (junio-octubre de cada año) en la zona de Mapimí. Estos grupos de datos del SPI se confrontaron a los porcentajes de recubrimiento de superficies criptogámicas (registrados en marzo y noviembre de cada año) y principales grupos de vegetación registrados en noviembre de cada año, después de las lluvias estivales, con el fin de evaluar el efecto de la sequía sobre la presencia de esos componentes del ecosistema.

Tabla 1. Valores del SPI de mayor relación con las coberturas de costras y vegetación.

Año	*SPI5*	*SPI12*
1996	*0.270 (H)*	*-0.190 (CN)*
1997	*-0.880 (CN)*	*-0.670 (CN)*
1998	*-1.280 (MS)*	*-1.850 (SS)*
1999	*-0.520(CN)*	*-1.000 (MS)*
2000	*0.710 (H)*	*0.160 (H)*
2001	*-1.190 (MS)*	*-0.880 (CN)*
2002	*0.380 (H)*	*-0.030 (CN)*
2003	*1.070 (H)*	*1.330 (H)*
2004	*1.350 (H)*	*1.090 (H)*
2005	*-1.380 (MS)*	*-0.320 (CN)*

H = año húmedo, CN = cercano a lo normal, MS = moderadamente seco, SS = Severamente seco (Clasificación de sequía, Mackee et al, 1995).

Resultados y discusión

Cubierta edafológica

Los suelos del sitio LTER-Mapimí, están constituidos fundamentalmente de depósitos aluviales y coluviales cuya repartición en el paisaje es función de la geomorfología. En la

zona de Bajada Superior (Matorral), los suelos son poco evolucionados, estructurados y débilmente diferenciados; esta disposición de suelo, cambia conforme se desciende hacia la Bajada Inferior donde los perfiles descritos en 1996, muestran suelos netamente diferenciados y estructurados. En general, se distinguen tres tipos de suelos, muy similares a los que diferenció Delhoume (1997), corresponde en nuestro caso a suelos distribuidos en función de la geomorfología del paisaje (Figura 2), todos agrupados en el Orden de los Aridisols (SSS, 1995) por sus regímenes de humedad de suelos arídicos y horizontes gypsicos, cálcicos o argílicos: los más gruesos y poco diferenciados, probablemente dentro de los Petroargid por la presencia de fragmentos de horizontes discontinuos petrogypsicos, dominan en la Bajada Superior correspondiente a la zona de Matorral y en las lomas de conglomerado (Antiguamente llamados Regosoles); los suelos bien diferenciados y de texturas medias o finas en la bajada inferior (Tipos II), están agrupados en los Gypsiargids (horizonte gypsico), los Calciargids (Horizonte cálcico) o Paloeoargids por su horizonte argilico continuo en todo el perfil, estos tipos de suelos están presentes en zonas de transición Matorral-Pastizal y predominan en el Pastizal, son los agrupados en Calcisoles o Gypsisoles por FAO-ISRIC-SICS (1998).

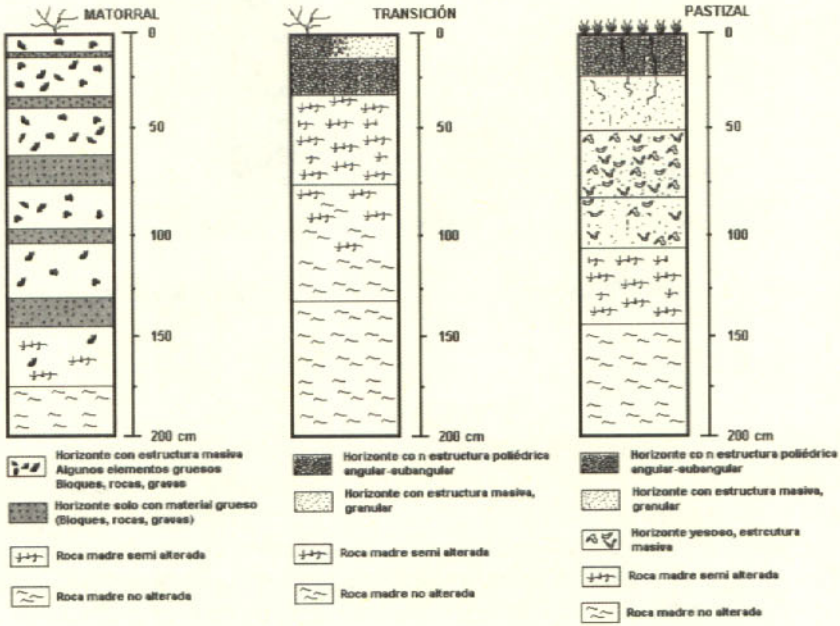


Figura 2. Perfiles edafológicos tipo, encontrados en zona de Bajadas y lomas de conglomerado.

La superficie del suelo

El inventario general de elementos de superficie muestra que el suelo encostrado o cubierto

de gravas y arenas predomina en Matorral y Pastizal (valores > 70%); le siguen la vegetación basal con 15% y el mantillo con 8% (Figura 3). Los valores porcentuales para cada elemento, se reflejaron muy próximos, lo que refleja una aparente homogeneidad entre los dos sitios de estudio; sin embargo, a este nivel lo que debe memorizarse es que el suelo desprovisto de vegetación es el elemento superficial mayormente representado en el medio, razón por la cual en zonas áridas, siempre debe ser considerado como un indicador del estado actual del ecosistema y con el registro permanente de sus fluctuaciones a través del tiempo, se podría inferir en la planeación y restauración de ecosistemas similares, como lo proponen Tongwey y Smith (2004).

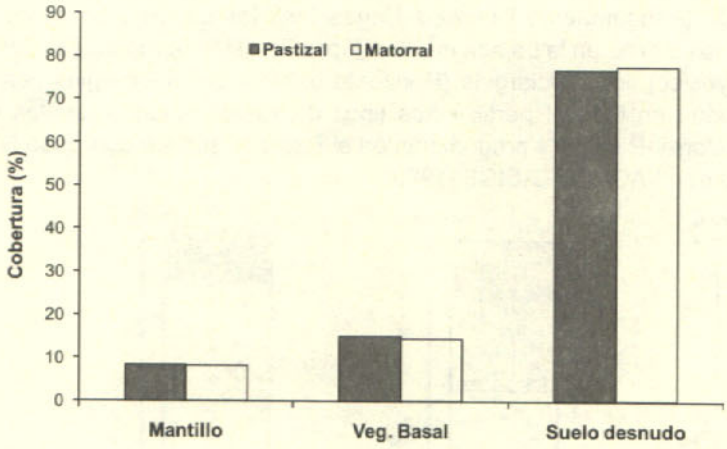


Figura 3. Cobertura relativa del estado superficial del suelo de Matorral y Pastizal.

Costras predominantes

Según la tipología de costras físicas de Casenave y Valentin (1989), en la Tabla 2 se aprecia que en la zona de Matorral predominan las de tipo estructural gruesa (EG), encontrándose sobre superficies de pendientes planas y fondos de cauces de escurrimiento; le siguen en importancia las de tipo erosión (ERO) que se encuentran en los bordos de cauces y zonas de fuerte escurrimiento, así como en lomas de montículos bajo la vegetación de tipo matorral y nopalera; respectivamente cubren un 62.6 y 15.8% de la superficie encostrada. En muchos casos, las costras EG están cubiertas por elementos gruesos como gravas, arenas y piedras, de forma suelta o adherida a la matriz del suelo superficial (Foto 1).

En Pastizal, al interior del arco de vegetación, predominan las costras de decantación (DEC), presentes también en amplias zonas de peladeros donde la pendiente es casi nula y el escurrimiento se interrumpe o se vuelve difuso, dando oportunidad al proceso de deposición de aluviones finos suspendidos en el agua de escorrentía. En esta misma zona, existen áreas

cubiertas por costras de erosión (ERO), que se distinguen de las anteriores por su continuidad y ausencia de fisuras de desecación (Fotos 2 y 3). A simple vista, en muchas áreas se aprecian masas de líquenes y cianobacterias que le confieren el apelativo de costras biológicas o criptogámicas (Benalp et al. 2003), cubren un 20% de la superficie encostrada en matorral y alrededor del 70% en pastizal.

Tabla 2. Superficie relativa de costras y piedras

Costras	*Pastizal*	*Matorral*
	(%)	
ERO	*26.9 (4.2)*	*15.8 (10.4)*
EG	*1.4*	*62.6*
DEC	*71.2 (67)*	*10.9 (9.9)*
Piedras	*0.5*	*10.7*

Los valores entre paréntesis, son los porcentajes de cianobacterias+líquenes

Foto 1. Costra gruesa con grava suelta.

Foto 2. Costra de Decantación.

Foto 3. Costra de erosión.

Especies de criptógamas

Las cubiertas criptogámicas que conforman las costras biológicas del suelo en Matorral y Pastizal, se distinguen por una mezcla de cianobacterias, líquenes y escasos ejemplares de musgos. Las cianobacterias pueden estar asociadas a plantas vasculares o recubriendo la superficie del suelo en zonas de peladero sea de forma continua o en manchas (Fotos 4 y 5). Dentro de los arcos de vegetación en el Pastizal, se encuentran cubriendo espacios intermata de *P. mutica* (longitudes entre 30 y 60 cm), o en forma discontinua en zonas de peladero, muchas veces asociadas a líquenes; esta disposición se presenta en Matorral, pero en áreas mucho menores. En Matorral, donde el escurrimiento en más acaudalado y fuerte, se desarrollan con

menos frecuencia estas películas biológicas, es más común encontrarlas bajo matorrales de *L. tridentata* o entre grupos de plantas de *O. rastrera* y de *Agave asperrima* Jacobi.

En el caso de los líquenes, su presencia visual generalmente es detectada por las estructuras redondas emergentes del resto de la película biológica, denominados apotecios (Foto 6), en muchos casos de color café-amarillento en los periodos secos y verdoso-amarillento en periodos húmedos con apariencia gelatinosa (Belnap, *et al* 2003). Los líquenes son abundantes en las zonas desnudas del Pastizal y bajo plantas vasculares, las costras asociadas a esos organismos cubren grandes superficies y probablemente su diversidad es elevada. Algunos crecen aislados con formas diversas sobre escamas de costras de decantación que han sido deformadas en su microhorizonte superficial por el efecto de retracción por la sequedad de arcillas tipo montmorillonita que la constituyen (Foto 7).

Foto 4. Mezcla de cianobacterias: distribución continua.
Nostoc sp, Scytonema sp.,Oscillatoria sp.

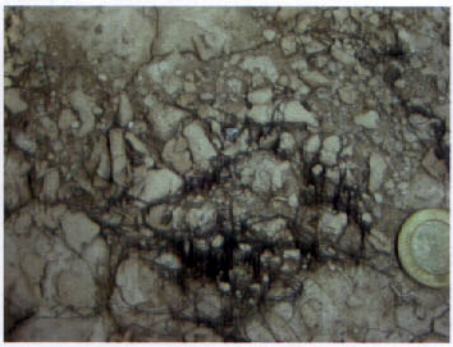


Foto 5. Cianobacteria: distribución en manchas.
Nostoc commune var. fragillatis Vaucher ex Bornet&Flahault, F.*

Foto 6. Líquen rodeado de cianobacterias: Plasmidium sp rodeado de Nostoc sp.

Foto 7. Líquen: Heppia conchiloba (L) Zahlbr.

En la Tabla 3, se presentan las cianobacterias inventariadas en este estudio, pertenecen a los géneros *Nostoc, Scytonema, Lygbya* y *Oscillatoria*, habiéndose identificado únicamente la especie *Nostoc commune* var. *fragillatis* Vaucher ex Bornet&Flahault, F., una de las más abundantes en el desierto Chihuahuense (Belnap *et al.* 2003). Los líquenes predominantes en matorral y pastizal pertenecen al género *Plasmodium* y en menor cantidad ejemplares del género *Hippia;* dentro de este último grupo, se ha identificado la especie *Hippia conchiloba* (L) Zahlbr (Foto 7). Cabe recordar que en el presente estudio, por el momento sólo se registra la superficie cubierta por la costra biológica sin diferenciar especies, ha sido hasta 2008 que se ha iniciado una colecta de este material para su identificación y la realización de una lista más completa de estos organismos, en colaboración con Jayne Belnap (Prof. Dr. de US Geological Survey, Forest and Rangeland Ecosystem Science Center, U.S.A.).

Tabla 3. Especies de cianobacterias y líquenes en el sitio LTER-Mapimi

CIANOBACTERIAS **CLASE** **ORDEN** **FAMILIA**	*Genero especie*	*Forma /Distribución*	*Unidad*
Cyanophyceae **Nostocales** **Nostocaceae**	*Nostoc commune var. fragillatis Vaucher ex Bornet&Flahault, F.**	*Costrosa, Escamosa/ Continua, Manchas*	*Pastizal Matorral*
	Microceleus sp.++*	*Costrosa*	*Pastizal*
	Scytonema sp.++*	*Costrosa*	*Pastizal*
	Lygbya sp.++	*Costrosa*	*Pastizal*
	Oscillatoria sp.++*	*Costrosa*	*Pastizal*

LIQUENES **CLASE** **ORDEN** **FAMILIA**	*Género especie*	*Forma/ Distribución*	*Unidad*
Ascomicetes *Lecanorales* *Heppiaceae*	*Heppia conchiloba (L) Zahlbr.*	*Costrosa, Escamosa/ Manchas*	*Pastizal> Matorral*
Ascomycetes *Verrucariales* *Verrucareaceae*	*Placidium sp.* sin. Catapyrenium sp., Dermatocarpon sp.*	*Costrosa*	*Pastizal > Matorral*

*Identificación directa: J. Belnap, identificación : ++M.R. Peralta y A. G. Avila (UMSN, UNAM)

Régimen pluviométrico mensual y anual

En el sitio Mapimí, la distribución mensual de la precipitación refleja la presencia de dos periodos importantes (Figura 4): uno lluvioso entre junio y octubre (periodo estival) que puede representar un 73% de la lluvia anual (277.72 mm de precipitación promedio anual en 30 años); el segundo periodo se caracteriza por la presencia de menos eventos plu-

viométricos y en menor cantidad de precipitaciones mensuales (periodo seco), abarca los meses de noviembre a mayo (el 27 % del total anual). Este régimen pluviométrico es el característico de zonas áridas de México, resultante de la interacción entre sus características geográficas: latitud, continentalidad, presencia de barreras orográficas importantes, y dos procesos de circulación atmosférica (Cornet, 1988): a) el flujo zonal de vientos del oeste, ligado con altas presiones subtropicales (de octubre a mayo), que produce la estación no lluviosa; b) el flujo de aire tropical NE-SO procedente del golfo de México, ligado con los vientos alisios, invade la zona de junio a septiembre, arrastrando humedad produciendo la ocurrencia de lluvias del periodo estival, en ocasiones muy localizadas. En muchos años se observa la influencia de frentes fríos y ciclones en las precipitaciones de invierno y el verano respectivamente (Landa *et al.*, 2008).

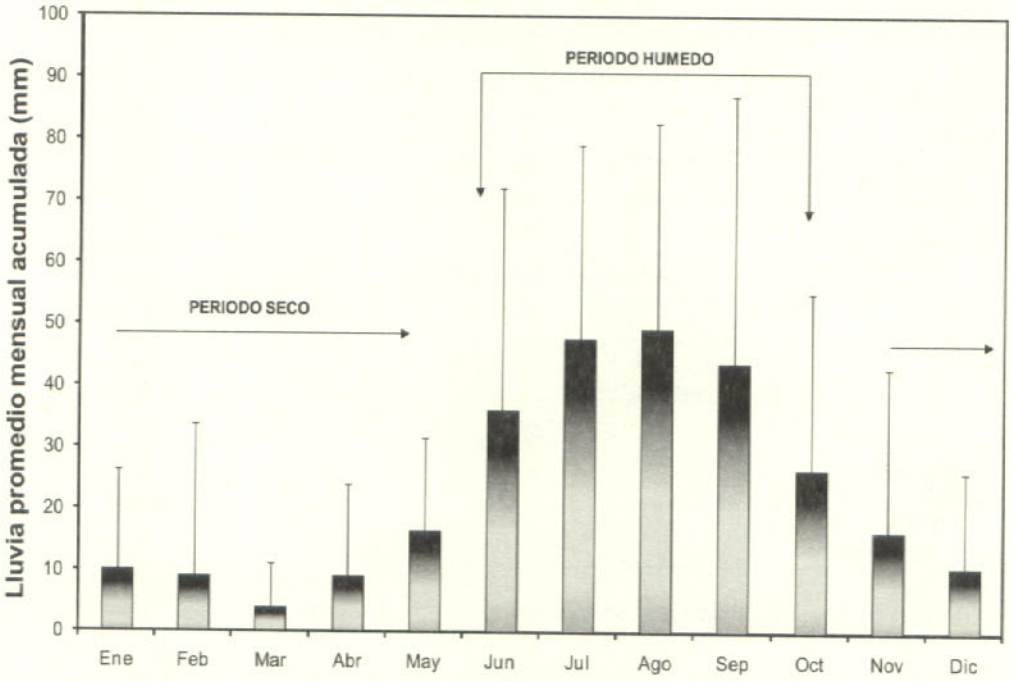


Figura 4. Distribución del promedio mensual histórico acumulado de la precipitación pluvial (1978-2008).

Evolución de la cobertura de costras biológicas

En esta década de observaciones, aparentemente no existe una alternancia de más superficie cubierta de costras biológicas en marzo que en noviembre o viceversa. Se observa una tendencia positiva entre la superficie encostrada y la precipitación acumulada en el año, es decir, a mayor precipitación mayor superficie de costras biológicas existentes, siendo más conspicuo este efecto a partir del tercer año (Figura 5). En pastizal

siempre se mantiene una mayor superficie con costras biológicas que en matorral, debido esencialmente a que en las zonas más bajas del paisaje, en este caso las de pastizal, el escurrimiento es laminar, menos acaudalado e intenso y la disposición de la vegetación en arcos de vegetación dispuestos perpendicularmente a la pendiente, contribuyen a una mayor retención de escorrentías, nutrientes y además hay mayor exposición de luz, todo esto propicia un mejor desarrollo de cianobacterias y líquenes sobre la superficie del suelo. Se sabe que en esas zonas, las especies vasculares, especialmente las anuales como muchas de las herbáceas tienen una posibilidad muy corta en tiempo, en la que la oferta evapotranspirativa está cubierta por presencia de humedad disponible, entre los meses de julio y octubre (Cornet, 1988; Montaña *et al.* 1995; Delhoume 1997). En el caso de los organismos como cianobacterias y líquenes asociados a costras de suelo, su desarrollo y expansión sobre la superficie del suelo, está ligado también a la cantidad de lluvias y la humedad que persiste en el suelo durante periodos estivales y a la presencia de luz (Belnap *et al.* 2003; Belnap et al. 2004).

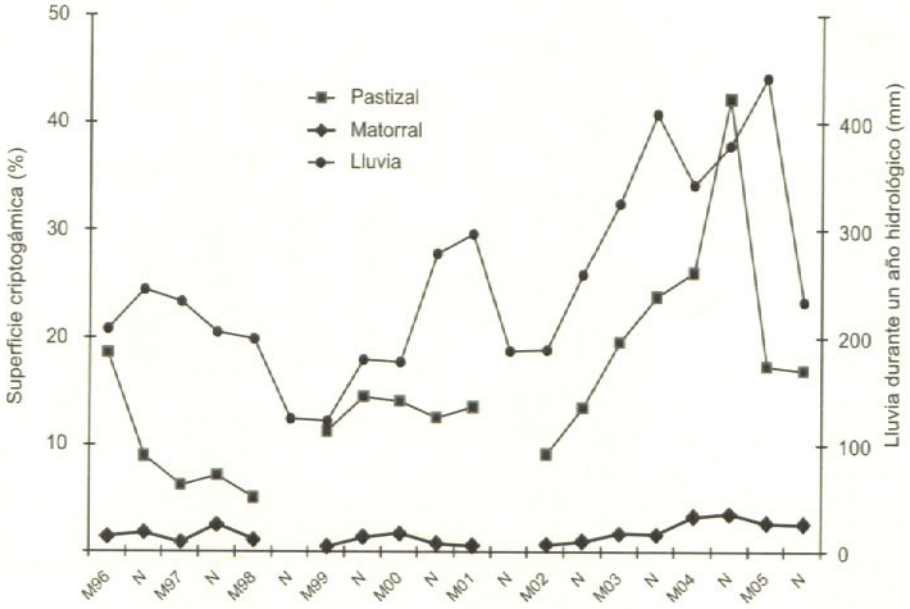


Figura 5. Variación de la superficie total con costras biológicas y la lámina de lluvia acumulada en un año hidrológico. M-96 M-05 = códigos del año hidrológico de febrero del año i a marzo del año siguiente; N-96 N-05 = códigos del año hidrológico de octubre del año i a noviembre del año siguiente.

Para pre-evaluar el efecto del déficit estacional de las lluvias sobre la presencia de costras biológicas, se corrieron pruebas de regresión entre la cobertura de costras biológicas y

la lluvia de primavera, verano, otoño, invierno, periodo estival (junio a octubre), periodo anual clásico (enero- diciembre) y año hidrológico (de octubre del $año_i$ hasta noviembre del $año_{i+1}$ o de febrero de $año_i$ hasta marzo del $año_{i+1}$). En la Tabla 4, se puede ver que para el periodo de lluvias (PaLluv) vs costras biológicas inventariadas en noviembre, los modelos tienen un grado de significancia aceptable (P < 0.05 y 0.02, respectivamente para Matorral y Pastizal); esto no ocurrió así, en el caso de las mediciones de marzo donde los valores de r^2 fueron mínimos y su significancia nula (aún para p = 0.1). En el caso de lluvias anuales enero-diciembre, los valores de regresión fueron nulos cuando se toman las lecturas de costras biológicas de marzo, alcanzando significancias aceptables para el caso de mediciones en noviembre (respectivamente r2 = 0.30 y 0.48 para Matorral y Pastizal), de la misma manera que en el caso anterior del periodo de lluvias.

Tabla 4. Modelos de regresión entre la superficie de costras biológicas y la lámina de lluvia acumulada en periodos estacionales e hidrológicos anuales.

Modelo	*n*	r^2	Ir^2I *GL(n-2)*
$CB_M(nov) = 0.006PaLlu + 0.201$	11	0.3624 (+)	0.3624 P<0.05
$CB_P(nov) = 0.056PaLlu + 2.905$	11	0.5310 (+)	0.4705 P<0.02
$CB_M(nov) = 0.005AnuT + 0.083$	11	0.3754 (+)	0.3625 P<0.05
$CB_P(nov) = 0.044AnuT+2.736$	11	0.4724 (+)	0.4693 P<0.02
$CB_M(mar) = - 0.003AnuH(m) + 2.629$	8	0.3052 (-)	NS
$CB_P(mar) = 0.081AnuH(m) – 5.337$	8	0.7439 (+)	0.6960 P<0.01
$CB_M(nov) = 0.006AnuH(n) + 0.013$	11	0.3752 (+)	0.3625 P<0.05
$CB_P(nov) = 0.055AnuH(n) + 0.284$	11	0.6294 (+)	0.5399 P<0.01
$CB_M(m,n) = 0.001 (An H (m,n))+1.210$	19	0.0268 (+)	NS
$CB_P(m,n) = 0.068 (An H(m,n)) -2.613$	19	0.6769 (+)	0.4425 P<0.001

Modelo más significativo; (-) relación negativa, (+) relación positiva; PaLluv = Precipitación acumulada en periodo lluvioso de cada año de medición (mm); AnuT = Precipitación acumulada en el año (enero-diciembre de cada año de medición) (mm); AnuH(m) = Precipitación acumulada en el año hidrológico de marzo del año i a febrero del año siguiente (mm); AnuH(n) = Precipitación acumulada en el año hidrológico de noviembre del año i a octubre del año siguiente (mm); An H(m.n) = Precipitación acumulada para el año hidrológico de marzo y noviembre de cada año (mm); $CB_P(m,n)$ y $CB_M(m,n)$ = respectivamente, porciento de superficie con costras biológicas en Pastizal y Matorral, inventariadas en marzo y noviembre de cada año; $CB_M(nov)$ = Porciento de superficie con costras biológicas en Matorral, inventariada en noviembre de cada año; $CB_P(nov)$ = Porciento de superficie con costras biológicas en Pastizal, inventariada en noviembre de cada año; $CB_M(mar)$ = Porciento de superficie con costras biológicas en Matorral, inventariada en marzo de cada año; $CB_P(mar)$ = Porciento de superficie con costras biológicas en Pastizal, inventariada en marzo de cada año; NS = No significativo.

Los valores más importantes de r^2 fueron cuando se considera la lluvia acumulada por año hidrológico (AnuH, marzo o noviembre) vs lecturas de costras biológicas (marzo o noviembre); la

significancia obtenida varió entre 0.01 y 0.05, para Pastizal y Matorral respectivamente, excepto en el caso de Matorral vs lluvia del año hidrológico de marzo, donde no hubo nada de significancia. Dada la significancia mayor encontrada para los años hidrológicos, se intentó generar un modelo más robusto, se determinó la relación para el total de mediciones en marzo y noviembre de cada año vs sus respectivas láminas de precipitación acumulada en el año hidrológico; en Pastizal se obtuvo una buena correlación (r = 0.8227), que se reflejó en la mejor significancia del total de los modelos analizados (Ir^2I = 0.4425 P<0.0001, GL_{n-2} = 19), mientras que para el caso de Matorral, solo se obtuvo una r de 0.1637 con una significancia nula.

Efecto de la sequía sobre la presencia de costras biológicas

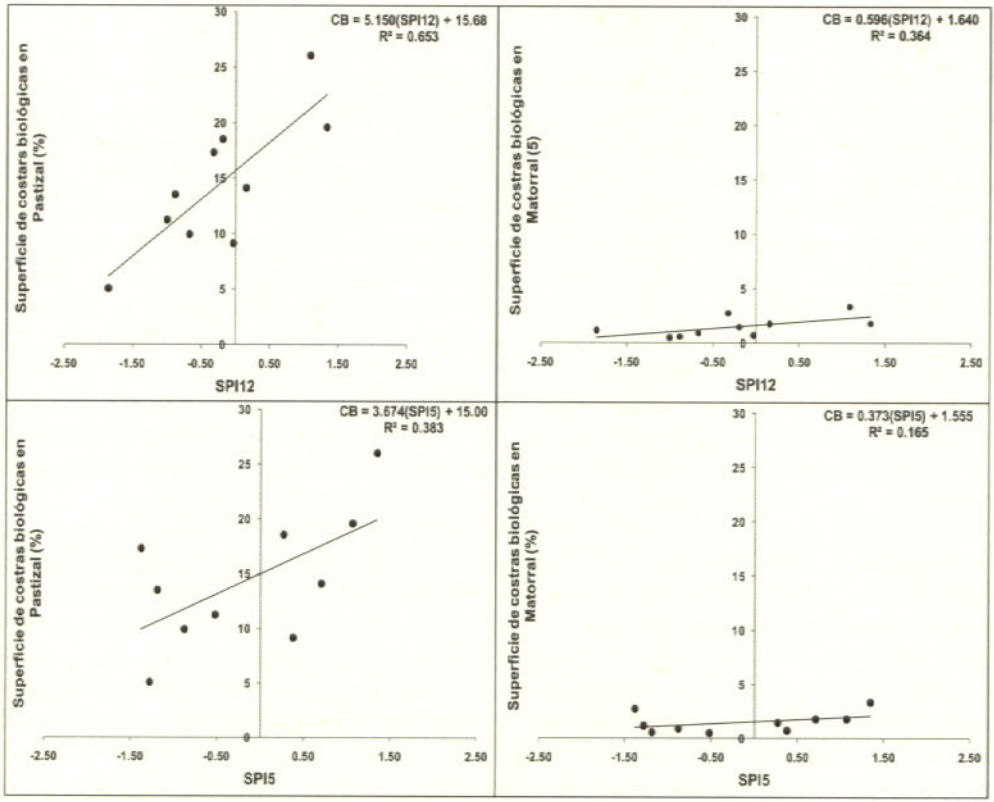


Figura 6. Relación de sequía con la cobertura de costras biológicas inventariada en noviembre de cada año. (a) = SPI12 vs CB en pastizal, (b) SPI5 vs CB en pastizal, (c) SPI12 vs CB en matorral, (d) SPI5 vs CB e matorral.

La relación que guardan la sequía y la presencia de costras biológicas, se percibe de forma más directa cuando se utilizan los valores del SPI. Para demostrarlo, se realizaron regresiones entre los valores del SPI3, SPI5, SPI7 y SPI12 vs los valores de coberturas de costras biológicas. Los

valores con relación significativa fueron los del SPI que consideran los promedios históricos de la lluvia del año hidrológico de noviembre y 11 meses atrás (SPI12) y de octubre hasta 5 meses atrás (SPI5), que además coinciden con el momento del inventario de costras en noviembre (Figura 6). El modelo más significativo se presentó para la zona de Pastizal (r2 0.65, $p < 0.01$), fue para el caso de la lluvia anual acumulada de diciembre $año_i$ hasta noviembre del $año_{i+1}$, esta última fecha correspondiente al mes en que se inventaría la cobertura de costras biológicas (CB). Para la misma condición (SPI12 vs CB en noviembre), en el caso de Matorral, existe una elevada significancia ($p < 0.05$), aunque el valor de r2 fue menor (r2 = 0.36). Si se observan los modelos para una condición de SPI5 vs CB, para Pastizal existe una mejor significancia (r2 = 0.38, $p< 0.05$) que para el caso de Matorral con una r2 = 0.36 y una $p < 0.05$, confirmando lo observado con las lluvias, donde se pudo constatar que hay un impacto visual más conspicuo cuando se considera la lluvia anual acumulada que para el periodo estival.

Considerando los niveles de significancia de los modelos de regresión adquiridos para lluvias y valores del SPI, el periodo anual hidrológico presentó una mejor correlación con las mediciones de costras en noviembre, y siempre superior en Pastizal que en Matorral; resultados lógicos si se considera que en los dos periodos la lluvia acumulada puede generar humedad e n el suelo que permite el desarrollo de costras biológicas, sea a lo largo de todo el año o durante el periodo estival cuando la demanda evapotranspirativa es suficiente (Montaña *et al*, 1995; Belnap *et al.*, 2003). La razón de que en el Pastizal exista siempre una mejor correlación de variables, se explica porque en esa zona la superficie encostrada siempre es mayor, además, el tipo de vegetación está organizada en arcos alineados perpendicularmente con las cotas de la pendiente del paisaje (mogotes y pastizales), entre los cuales existen zonas desprovistas de vegetación conocidas como peladeros, donde el escurrimiento se ve interrumpido en los frentes de dichos arcos. Esa distribución organizada de vegetación, propicia condiciones de humedad, luz y aprovisionamiento de nutrientes que permiten una mayor propagación de líquenes y cianobacterias asociadas a las películas superficiales del suelo, coincidiendo con lo que encontraron Belnap *et al.* (2004) y Awadhwal y Thiersten (1985) en otras zonas áridas de E.U, Australia y África. En el caso del Matorral, la disposición de vegetación menos organizada, copas más frondosas, alturas más conspicuas, presencia de red hidrográfica encausada y los grandes aportes de coluviones gruesos provenientes pendiente arriba, condicionan a esta zona para impedir, hasta cierto punto, la propagación y crecimiento continuo de líquenes y cianobacterias. La presencia de alternancias de rocas, grava y arena dentro del perfil y depositados sobre la superficie del suelo, evidenciados con los perfiles edafológicos interrumpen los ciclos de crecimiento de criptógamas en la zona de matorral, ya que se minimiza la presencia de luz, CO_2 y nutrimentos de aporte por escurrimiento. Este efecto se acentúa por los fuertes escurrimientos en Bajada Superior, erosionan la superficie del suelo y provocan un rompimiento de la costra, que se pierde y es transportada aguas abajo hacia los sitios de pastizal, impidiendo su propagación en el Matorral y favoreciéndola en zonas del Pastizal, aguas abajo. Estos resultados muestran cómo la variabilidad espacial y temporal de la sequía impacta de forma distinta a la presencia de costras biológicas, estas mediciones permanentes podrán ser base de planeaciones estratégicas sustentables en el manejo de recursos naturales de zona áridas, como lo están haciendo en otros países (Eldridge, 2003; Evans, *et al.*, 2003; Cortina *et al.* 2006;

Tongwey *et al,* 2004). Las razones expuestas son a favor de probar la hipótesis planteada en el estudio, de hecho la prueba de Ho se rechaza, ya que la condición $|r| \geq r_{\alpha}(GL)$ se cumplió para las condiciones de SPI12 y SPI5 vs CB de Pastizal y Matorral. Estos resultados podrán ser utilizados con estudios complementarios sobre el impacto de escurrimiento, el fotoperiodo y las emisiones de CO_2 sobre la presencia de costras y grupos principales de plantas de las comunidades representativas de ecosistemas áridos.

Conclusiones

En zonas de pastizal, las costras biológicas pueden ser fuertemente impactadas por sequías anuales, las tasas de cobertura se mantienen muy próximas a cero si esa sequía se prolonga por más de dos años. En Matorral es menos conspicuo este efecto, pero los resultados de regresión muestran el mismo patrón de relación positiva del impacto de sequía, a menos valor del SPI, menor cobertura de costras biológicas. El índice de precipitación estandarizada resultó ser una herramienta estadística, que permite apoyar la hipótesis de que con los inventarios a largo plazo de la lluvia y varios elementos biológicos en sitios como Mapimí, se pueden llegar a poner en evidencia los impactos reales de la sequía sobre esos ecosistemas. Los resultados permiten constatar y resaltar las adaptaciones fisiológicas de las cianobacterias y líquenes para utilizar la humedad del suelo, en especial cuando el valor del SPI12 o SPI5 se mantiene por encima de cero, cubriéndose así las demandas evapotranspirativas que permiten la continuidad de la vida en el ecosistema (resiliencia). Para evaluar el impacto de sequías y manejo del ecosistema, a través del registro permanente de indicadores biológicos como las costras biológicas, se recomienda usar en primer lugar el valor del SPI12, seguido del valor del SPI5. El problema de escases de agua de lluvia, que impacta la cobertura de costras biológicas, se acentúa por el manejo de forrajes ya que los suelos en estas zonas del norte de México, son sometidos a fuertes presiones de sobrepastoreo y pisoteo por el ganado, lo que provoca una desagregación y compactación del suelo, que transforma el horizonte superficial en un medio más hostil para la proliferación de plantas. Al perderse las costras criptogámicas por la constante actividad del ganado bovino, se pone en riesgo el papel que juegan en los ciclos biogeoquímicos de ecosistemas áridos.

El sistema de vigilancia permanente adoptado en este estudio sobre el monitoreo de clima, de la superficie del suelo y la vegetación en dos comunidades representativas del desierto chihuahuense, servirá más adelante, para visualizar las relaciones que guardan esos elementos biológicos del sistema, con la lluvia, y posteriormente para evaluar el impacto del clima (sequía), sobre el tipo de manejo de los recursos y cómo el hombre contribuye en esos cambios. Con los registros sobre los efectos de herbívoros como los lagomorfos, bovinos y roedores, se podrán proponer nuevas estrategias de manejo sustentable en la región y sistemas de vigilancia ecológica más perdurables que aseguren la continuidad del desarrollo sustentable.

Literatura citada

Awadhwal, N.K., G.E. Thierstein, 1985. "Soil crust and its impact on crop establishment: a review". *Soil Tillage Research*. 5 : 289-302.

Belnap J., B. Büdel, O.L. Lange, 2003. Biological Soil Crusts : Characteristics and Distribution. In Belnap J., Lange O.L. (Eds) Biological Soil Crusts: Strauctures, Function, and Management. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 3-30.

Belnap, J., S.L. Philips, M.E. Miller, 2004. Response of desert biological soil crusts to alterations in precipitation frequency. *Oecologia*, 141:306-316.

Bowker M.A., J. Belnap, M.E. Miller, 2006. Spatial modeling of biological soil crusts to support rangeland assessment and monitoring. *Rangeland Ecology & Mangement*, 59 (5): 519-529.

Breimer,R., 1995. Soil and Landscape Surey of the Mapimi Biosphere Reserve, Durango, México. MAB-UNESCO, Montevideo, Uruguay, pp. 1-27.

Casenave A., C. Valentin, 1989. Les États de Surface de la Zone Sahélienne. Influece sur l'infiltration. IRD, Paris, Francia. pp. 229.

Cornet, A., 1988. Principales Caractéristiques Climatiques. p.p. 45-76, in Montaña, C. (ed.) Estudio Integrado de los Recursos Vegetación, Suelo y Agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimí. INECOL, Xalapa, Veracruz, México.

Cortina, J., F.T. Maestre, R. Vallejo, M.J. Baeza, A. Valdecantos, M. Pérez-Devesa 2006. Ecosystem structure, Function, and restoration success. Are they related?. *Journal for Nature Conservation*. 14:152-160.

Delhoume, J., 1997. Functionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride. Réserve de la biosphére de Mapimi, Nord-Mexique. Thése et document microfichés. IRD-Paris, Francia. pp. 145-176.

DWRSC (Departement of water resources of State California), 2008. Water & border area, Climate Change, an introduction. 61 págs.

Eldridge D.J., 2003. Biological Crusts and Water Relations in Australian Deserts. In Belnap J., Lange O.L. (Eds) Biological Soil Crusts: Strauctures, Function, and Management. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp.315-326.

Evans D., O.L. Lange, 2003. Biological Soil Crusts and Ecosystem Nitrogen and Carbon Dynamics. In Belnap J., Lange O.L. (Eds) Biological Soil Crusts: Strauctures, Function, and Management. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 263-279.

FAO, ISRIC, SICS. 1998. World Reference Base for Soil Resources (WRB). World Soil Resources Reports 84. FAO. Rome. 90 pp.

García-Arevalo, A. 2002. Vascular Plants of the Mapimí Biosphere Reserve, Mexico. A *Checklist.* Sida, 20(2):797-807.

García-Pichel F. and J. Belnap, 2003. Small-scale environments and distribution of biological soil crusts. In Belnap J., Lange O.L. (Eds) Biological Soil Crusts: Strauctura, Function, and Management. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 193-201.

Heim, Jr., R:R: 2000. Drougth indices: a review. P. 159-167, In Drought, a global assessment,Wilhite, D.A. Ed., Routledge, New York, U.S.A. 396 pp.

Hernández L., A.G. Romero, J.W. Laundré, D. Lightfoot, E. Aragón, J. López Portillo, 2005. Changes in rodent community structure in the Chihuahuan Desert México: comparisons between two habitats. Journal of Arid Environments 60 (2005) 239–257.

Karnieli A., R. Kokaly, N.E. West, R. N. Clark. 2001 In Belnap J., Lange O.L. (Eds) Biological Soil Crusts: Strauctura, Function, and Management. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 431-455.

Landa R., V. Magaña y C. Neri. 2008. Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. SEMARNAT, SPGSA, México. 133 p.

Maas M., M. Equihua, 2008. Red Mexicana de investigación ecológica a largo plazo. Ciencia y Desarrollo, 34(215): 16-17.

McKee, T., N. Doesken, and J. Kleist. 1993. "*The relationship of drought frecuency and duration to time scales.*" American Meteorological Society, 9th. Conference on applied climatology. 179-184 pp.

Montaña, C., B. Cavgnaro, O. Briones, 1995. Soil water use by co-existing shrubs and grasses in the soutern Chihuhuan Desert, Mexico. Journal of Arid Environments, 31:1-13.

Muñoz-Robles C.A., D. Nuñez-López, H. Gadsden , J.A. Rodríguez, V.M. Reyes-Gómez, Hinojosa O, 2006. Création d'un Observatoire de la Sécheresse dans l'État de Chihuahua au Mexique. *Science et Changements Planétaires - Sécheresse.* 17(4) : 467-474.

Núñez-López, D., Muñoz, C, Reyes-Gómez, V.M. Reyes-Gómez, I. Velasco-Velasco, H. Gadsden, 2007. Characterization of drought at different time scales in chihuahua, méxico Agrociencias. 41 :253-261

Reyes-Gómez, V.M., D. Núñez-López, C. A. Muñoz-Robles, H. Gadsden, J.A. Rodríguez, M. A. López, O.R. Hinojosa, 2006. Caractérisation de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant Rio Conchos, Chihuahua, Mexique. *Science et Changements Planétaires - Sécheresse.* 17(4) : 475-484.

Reyes-Gómez V.M, D. Viramontes-Pereida, N. Miranda-Ojeda, P.B. Sanchez-Rodríguez, O. Viramontes-Olivas, 2007. "Papel hidrológico-ambiental de las propiedades hidráulicas del suelo superficial en la cuenca del Río Conchos. Ingeniería Hidráulica en México, XXII (4):33-46

Soil Survey Staff. 1995. Claves para la taxonomía de suelos. SMCS, Montecillos, México. 306 pp

Tongwey D.J. and E.L. Smith, 2004. Soil surface features as indicators of rangeland site productivity. Australian Rangeland Journal. 11: 15-20.

CAPITULO 6

Cambio climático y vulnerabilidad ecológica: impacto en la hidrodinámica y contaminación en cuerpos de agua costeros

Eugenio Gómez Reyes

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México

Indice

Resumen
Abstract
Introducción
Objetivos
Metodología
Resultados y Discusión
Conclusiones
Literatura Citada

Resumen

En este capitulo se investigan los impactos en la hidrodinámica y calidad del agua de los cuerpos de agua costeros vulnerables al cambio climático (lagunas y en general humedales). El análisis se basa en la representación conceptual de los cuerpos de agua costeros como sistemas de paso del flujo subterráneo que forman áreas inundadas por el afloramiento de la capa freática. Se simula numéricamente el escenario para la condición actual de agua dulce de los cuerpos de agua costeros. Se emplean las ecuaciones de movimiento y del transporte de salinidad unidimensional para flujo de agua subterránea en medios porosos y se aproxima su solución con métodos numéricos de diferencias finitas. Las velocidades del flujo de agua subterráneo obtenidas para mantener el agua dulce en los cuerpos de agua costeros, son de la misma magnitud que las reportadas por otros autores en sistemas costeros de la vertiente del Golfo de México.
Se simula el escenario para las condiciones de ascenso del nivel del mar en 1 metro por efecto del calentamiento global. Se encuentra que la velocidad del flujo subterráneo decrece como consecuencia de la disminución del gradiente hidráulico por la elevación del nivel del mar. La salinidad, sin embargo, no avanza hacia tierra adentro a pesar de la disminución del flujo de agua dulce. Por lo que se espera un incremento en la profundidad de los cuerpos de agua costeros en 1 metro, por inundación ocurrida a consecuencia del ascenso del nivel freático en respuesta del ascenso del nivel del mar en 1 metro. Así mismo se concluye que los cuerpos de agua costeros no parecen ser vulnerables a la intrusión salina inducida por el ascenso en el nivel del mar en respuesta al calentamiento global.

Abstract

This paper investigates effects of sea level rising due to global warming on the hydrodynamics and water quality of the most expected vulnerable coastal water bodies, coastal lagoons and wetlands. These water bodies are considered as flow-through systems with respect to ground water, whereby flooding areas are maintained by seepage once the water table races above the floor and side walls of the coastal water bodies. Through numerical simulations of the actual fresh water content of the coastal water bodies, it is deduced a required ground water velocity flow of about 16.4 m/year to constraint the salinity concentration close by the bar that isolates the coastal water bodies from the ocean; similar magnitudes values for ground water flow have been reported on coastal systems along Mexican Gulf shores. This simulation was considered as the baseline to evaluate deviations for other scenarios. Numerical simulations are developed by solving the momentum and salinity transport equations for underground flow in porous medium, using finite differences techniques.
To assess the effects of sea level rising by the global warming on the coastal water bodies, a numerical simulation was conducted by raising up 1 m the sea level and maintaining the other boundary conditions as well as aquifer parameters constant respect to the baseline

conditions. Results show a decrease of about 1% on the fresh water underground flow as response of the decrease on the hydraulic gradient by raising up 1 m the sea level boundary condition. Salinity intrusion, however, remained at the same position as the baseline conditions. It is expected that depth of coastal water bodies increases up to 1 m by the effect of global warming, however, these water bodies seem to be no sensitive to salinity changes by the effect of raising up 1 m the sea level.

Introducción

Los cuerpos de agua costeros de México son ecosistemas complejos, de transición entre los ambientes terrestres y marinos. Están considerados como los ecosistemas más productivos del país (Day *et al.*, 2004) con una gran riqueza en biodiversidad y recursos, que sostienen múltiples actividades económicas y sirven de asiento a una buena parte del tejido urbano. La interacción de los procesos que ahí ocurren crea sinergias entre los agentes acuáticos terrestres y los hidrodinámicos marinos que resultan en la determinación de la salud de los cuerpos de agua costeros.

El litoral mexicano posee una amplia variedad de cuerpos de aguas costeros como los estuarios, lagunas costeras, marismas, pantanos, planicies inundables, cenotes, zonas intermareales. Sin embargo, la mayoría de las costas bajas, con extensos cuerpos de agua someros (lagunas costeras y en genera humedales), representan la fracción de territorio más vulnerable al efecto del ascenso del nivel del mar. En particular, estos cuerpos de agua se les identifica como sistemas de paso del flujo subterráneo que forman áreas inundadas por el afloramiento de la capa freática (Lillesand y Kiefer, 2000) y que pueden estar en comunicación con otros cuerpos de agua costeros (Figura 1). Estos sistemas además se encuentran bajo un continuo proceso alarmante de degradación en donde los drenajes urbanos y los industriales constituyen los principales agentes de contaminación; otros problemas cada vez más recurrentes son la intrusión salina, la deforestación y el azolvamiento.

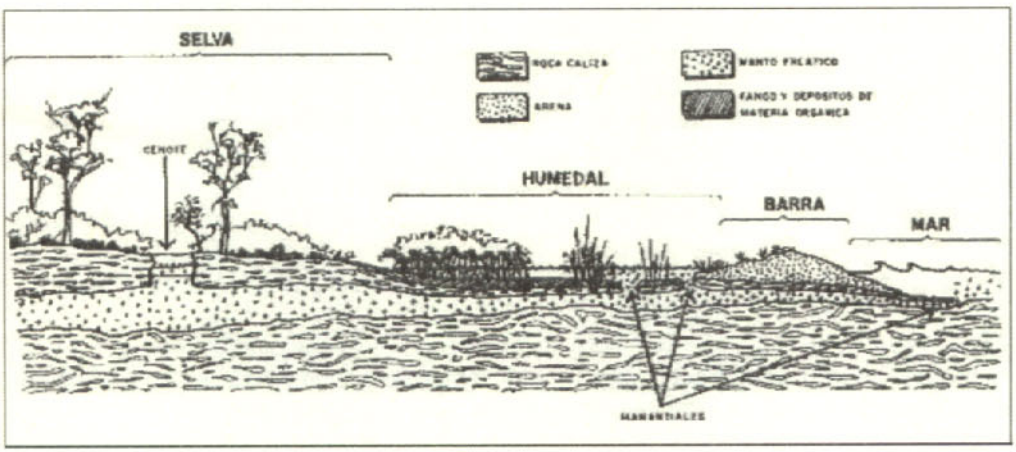


Figura1. Esquema hidrológico de los cuerpos de agua costeros someros (de acuerdo a Morales, 2009).

La situación es poco alentadora para estos cuerpos de agua vulnerables, sobre todo si se considera que el cambio climático global será uno de los factores degradantes en la calidad del agua por su influencia en el ascenso del nivel del mar. Como medida de reducción de riesgo frente al cambio climático, se hace indispensable evaluar la vulnerabilidad de los cuerpos de agua costeros para planificar sus procesos de adaptación al cambio climático.

En este capítulo se caracteriza la vulnerabilidad de los humedales costeros ante los efectos del cambio climático del ascenso del nivel del mar, aplicando modelos numéricos de la hidrodinámica y del transporte de contaminantes en prototipos de cuerpos de agua costeros. Se evalúa la salud de los cuerpos de agua costeros mediante la determinación de la intrusión salina al cuerpo de agua.

Objetivos

El objetivo de este trabajo es determinar el impacto en la hidrodinámica y calidad del agua de los cuerpos de agua costeros vulnerables al cambio climático. El efecto resultante en la salud de los cuerpos de agua por las amenazas ante el ascenso del nivel del mar, es evaluado mediante la determinación de la intrusión salina al cuerpo de agua.

Metodología

El esquema conceptual que representa los cuerpos de agua costeros vulnerables al cambio climático se muestra en la Figura 2. En este prototipo se han incorporado las características fundamentales que determinan el comportamiento hidrológico de los sistemas de aguas costeros someros, en donde el forzamiento del ascenso del nivel del mar está determinado directamente como condición de frontera del ambiente marino, mientras que el forzamiento por las lluvias está incorporado en la condición de frontera del ambiente terrestre a través de la variación del nivel freático generado por la recarga de agua al acuífero. Se considera que el cuerpo de agua está separado del mar por una barra de aproximadamente medio kilómetro de ancho, mientras que la longitud característica del cuerpo de agua se considero de 10 km. También se ha incorporado el efecto de la zona de afloramiento del nivel freático sobre la frontera terrestre del cuerpo de agua costero.

Para evaluar las fluctuaciones del nivel del agua en los cuerpos costero (*i.e.*, la respuesta de la elevación del nivel freático del sistema subterráneo costero), sujeto al ascenso del nivel del mar por efecto del cambio climático, se realizan simulaciones numéricas de la hidrodinámica y la distribución de la salinidad en el prototipo de cuerpo de agua costero. Las simulaciones son generadas con modelos numéricos del flujo de agua y del transporte de salinidad en medio poroso isotrópico, en donde, por ser el acuífero un sistema dinámicamente friccionante, las fluctuaciones de la marea no llegan a reflejarse en la respuesta del nivel freático (Essaid, 1990; Harrar *et al.*, 2001). Los modelos resuelven numéricamente

las ecuaciones de movimiento y conservación de salinidad en una dimensión longitudinal, a lo largo del cuerpo de agua sobre la planicie costera. Campos de velocidad variable, multidimensiones y sistemas anisotrópicos incrementan la dificultad en la modelación. Sin embargo el caso simple unidimensional se ha seleccionado porque si un algoritmo numérico no puede modelar casos simples correctamente, entonces es de poca utilidad en situaciones de casos más complicados.

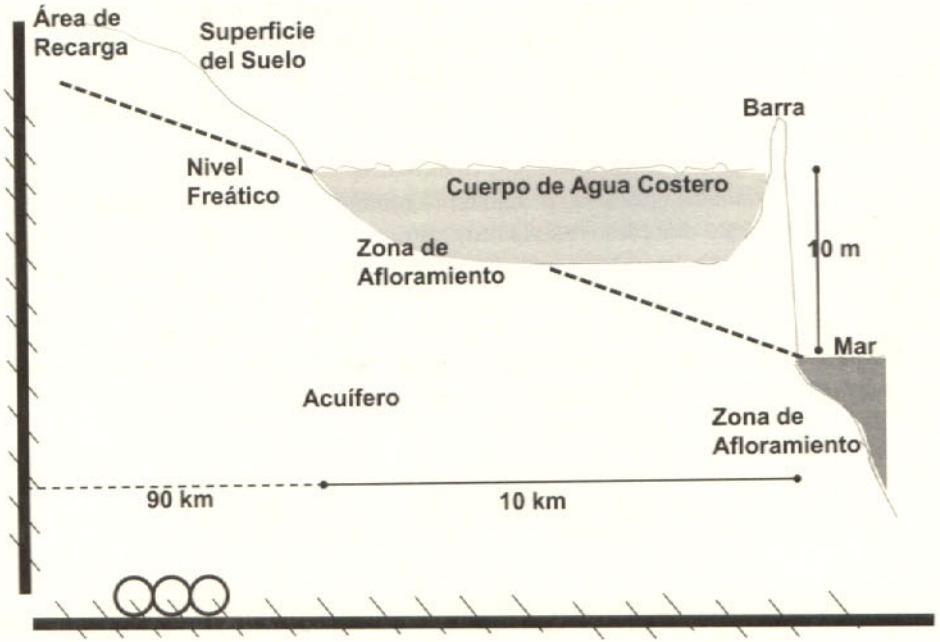


Figura 2. Prototipo del cuerpo de agua costero vulnerable al cambio climático.

La ecuación de movimiento en medio poroso isotrópico y donde las fluctuaciones del nivel freático (h) son pequeñas en comparación con el espesor medio de acuífero (h_o), *i.e.*, $h << h_o$, puede ser linearizada para el caso unidimensional de agua dulce (densidad constante), quedando expresada como la ecuación de difusión (Bear, 1979):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S}{T}\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (1)$$

En donde h (en m) es función de la distancia desde la costa x (en m) y del tiempo t (en días); T (m^2/día) es la transmisibilidad y S (adimensional) es el coeficiente de almacenamiento.

Por otra parte, la ecuación de conservación de salinidad (*C*), para el caso unidimensional, queda expresada como la ecuación de transporte (Ingebritsen y Sanford, 1998):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u \cdot C) + D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (2)$$

En donde *C* (en $\%_o$) es función de la distancia *x* y del tiempo *t*; *D* (m^2/día) es el coeficiente de dispersión longitudinal y en donde la velocidad del flujo del agua en el acuífero *u* (cm/día) es considerada proporcional al gradiente hidráulico de acuerdo a Ley de Darcy, *i.e.*, $u = -K\,\%$, donde la conductividad hidráulica $K=T/h_o$, en m/día; h_o es el espesor del acuífero en metros (Díaz-Delgado *et al.*, 2006).

La ecuación (1) es resuelta utilizando el esquema numérico implícito de Crank-Nicolson en diferencias finitas. Este algoritmo resulta muy conveniente para la solución de las ecuaciones diferenciales parabólicas toda vez que es de segundo orden de aproximación e incondicionalmente estable, lo que permite realizar simulaciones de largo periodo con intervalos de tiempo solo limitado por su criterio de consistencia (Remson *et al.*, 1971). De esta manera, la ecuación diferencial parcial (1) queda reducida a la siguiente ecuación algebraica que se programa para su solución:

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \frac{T}{S} \bullet \frac{\Delta t}{\Delta x^2}\left[\frac{\left(h_{i+1}^n - 2h_i^n + h_{i-1}^n\right) + \left(h_{i+1}^{n+1} - 2h_i^{n+1} + h_{i-1}^{n+1}\right)}{2}\right] \qquad (3)$$

Donde:
i, es el índice en la dirección longitudinal;
k, es el índice en el tiempo;
Δx, incremento en la dirección longitudinal;
Δt, incremento de tiempo.

En cuanto a la ecuación (2), su solución numérica está basada en un esquema explícito de segundo orden en espacio y de primer orden en tiempo (hacia adelante) en diferencias finitas, como es sugerido por Roache (1976). De esta manera, la ecuación (2) queda expresada como:

$$C_i^{n+1} = C_i^n - \frac{\Delta t}{2\Delta x}\left(u_{i+1}^n C_{i+1}^n - u_{i-1}^n C_{i-1}^n\right) + D \bullet \frac{\Delta t}{\Delta x^2}\left(C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n\right) \qquad (4)$$

Las ecuaciones (3) y (4) se programaron separadamente en lenguaje computacional de MatLab (1992) para obtener la solución de la elevación del nivel freático y de la distribución

de la salinidad, respectivamente. El acoplamiento de ambas ecuaciones se establece a través del cálculo del campo de velocidad, obtenido con la aplicación de la Ley de Darcy. La resolución espacial (Δx) fue de 50 km; T=4500 m^2/día que equivale a la transmisibilidad de un buen acuífero conductor de agua y S del 2% para el caso promedio de almacenamiento de agua en acuíferos en medios porosos (Freeze y Cherrey, 1979 y Todd, 1980). Por otra parte, se utilizo una estimación media de D=4.17X10^{-4} m^2/s de acuerdo a Martin *et al.* (2004). La solución para h se ejecutó hasta alcanzar estado estacionario (50 años) con un Δt=10 días; mientras que para C, el estado estacionario se alcanzo a los 100 años para un Δt=2 horas.

Resultados y Discusión

Los escenarios simulados determinaron las respuestas del nivel freático y de la intrusión debido al incremento del nivel del mar generado por el cambio climático. El aumento extremo del nivel del mar proyectado para el año 2100 (*i.e.*, en aproximadamente 100 años) fue de 1 metro, de acuerdo a las tendencias máximas de largo plazo del nivel del mar (10 mm/año) reportado por Ortiz-Figueroa y González-Navarro (2008).

Primero se simuló el escenario base del sistema que caracteriza las condiciones actuales de los cuerpos de aguas costeros. En seguida se simuló el escenario del ascenso en el nivel del mar. La diferencia en la respuesta del nivel freático y de la intrusión salina entre la simulación base y la del ascenso en el nivel del mar determinó el impacto en la hidrodinámica y salud de los cuerpos de agua costeros ante el cambio climático.

La principal característica de los cuerpos de agua costeros, que definen los gradientes hidráulicos y por ende la velocidad del flujo subterráneo, es el hecho de que la mayoría de estos cuerpos son de agua dulce (Contreras-Espinosa, 1993). Es decir, se puede considerar que actualmente a lo más la intrusión salina está confinada en los primeros 5 km de la costa. De manera tal que no hay contacto del agua salada subterránea con el cuerpo de agua costero. La simulación que define el confinamiento de la salinidad en los primeros 5 km de la costa determina las condiciones actuales de los cuerpos de agua costero, *i.e.*, escenario base (Figura 3). Este escenario base se obtuvo para un gradiente hidráulico de 10^{-3} *i.e.*, 100 m de altura en el nivel freático en 100 km de longitud del acuífero. El gradiente hidráulico requerido para confinar la salinidad en los primeros 5 km de la costa es factible de obtenerlo considerando que se llegan a encontrar elevaciones del terreno por arriba de los 100 m antes de los 100 km de extensión de las planicies costeras, en donde la recarga del acuífero llega a tener lugar. En todo caso, el escenario base determina velocidades promedio de flujo subterráneo de 16.4 m/año, para una conductividad hidráulica de 450 m/día. Estas magnitudes de velocidades han sido reportadas también por otros investigadores en los sistemas costeros de la vertiente del Golfo de México (costa de Florida), oscilando su rango entre 1.04 a 42 m/año (Bugna *et al.*, 1996; Burdon, 1964 y Cable *et al.*, 1996a, 1996b, 1997a y 1997b). Incluso para la laguna costera *Great South*

Bay de *Long Island*, Nueva York, que tiene las dimensiones características del prototipo de sistema modelado, se ha determinado una velocidad de flujo subterráneo de 14.6 m/año (Bokuniewicz, 1980); aunque con este flujo no se logra mantener el agua dulce de la laguna, es necesario considerarlo para mantener el gradiente de salinidad observado dentro de la laguna (Gómez-Reyes, 1986).

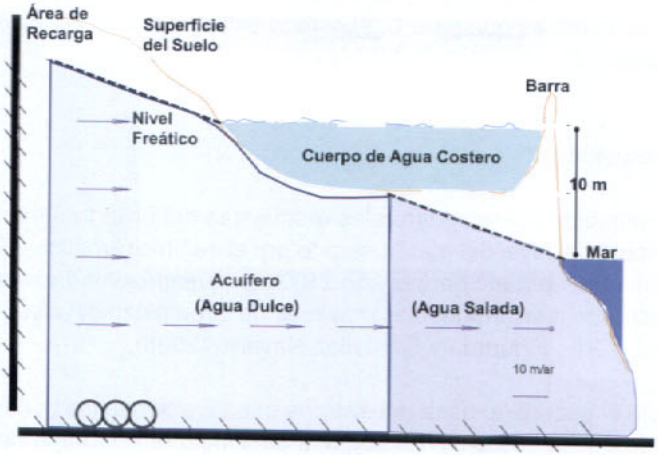


Figura 3. Esquema de las condiciones actuales de los cuerpos de agua costeros según la simulación del escenario base.

En cuanto al escenario del ascenso en el nivel del mar generado por el cambio climático, se simuló considerando 1 m de elevación del nivel del mar en la frontera marina, mientras que las condiciones de la frontera terrestre (nivel freático en la zona de recarga) y todos los demás parámetros (transmisibilidad, almacenamiento, conductividad hidráulica, dispersión) se mantuvieron constantes respecto a la simulación del escenario base. De tal manera que los resultados de esta simulación separan los efectos del nivel del agua y la salinidad que se producen en los cuerpos costeros por el ascenso en el nivel del mar fomentado por el cambio climático.

En este caso, la velocidad del flujo subterráneo decrece instantáneamente al decrecer el gradiente hidráulico por la elevación del nivel del mar. La salinidad avanza hacia tierra adentro a consecuencia de la disminución del flujo de agua dulce. El avance del agua salada a la zona de aforamiento del nivel freático en el cuerpo de agua, determina la vulnerabilidad del cuerpo de agua costero por la intrusión salina. La simulación indica que el nivel freático incrementa de manera casi linear en los primeros 10 km de la costa, hasta recuperar su nivel de condición base en la zona de recarga (Figura 4). Es decir, se espera que se incremente la profundidad de los cuerpos de agua costeros en 1 metro, por inundación ocurrida a consecuencia del ascenso del nivel freático en 1 metro a respuesta del ascenso del nivel del mar en 1 metro. Las velocidades del flujo subterráneo disminuyen en un poco más del 1% a las condiciones actuales, *i.e.*,

resultaron en promedio de 16.2 m/año. Por lo que el impacto en el avance de la salinidad hacia la zona de afloramiento del nivel freático del cuerpo de agua es nulo (Figura 5).

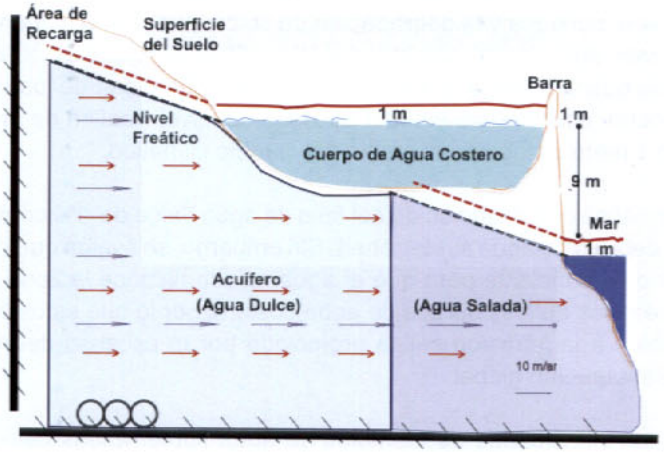


Figura 4. Esquema de las respuestas del nivel del cuerpo de agua (en rojo), el flujo subterráneo (en rojo) y la intrusión salina debido al ascenso en el nivel del mar por el cambio climático.

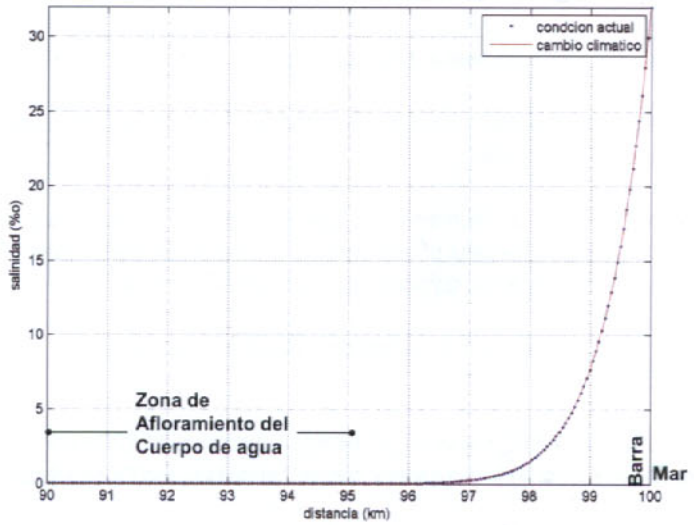


Figura 5. Respuestas de la distribución de salinidad en los sistemas de agua costeros a las fluctuaciones del nivel del mar por el cambio climático.

Conclusiones

La conceptualización de los cuerpos de agua costeros (lagunas costeras y en general humedales) como sistemas de paso de flujo subterráneo permite explicar el comportamiento hidrológico del nivel del agua y la degradación de su calidad por la influencia del ascenso en el nivel del mar atribuido al cambio climático. El análisis numérico de este modelo conceptual indica que se espera un incremento en la profundidad de los cuerpos de agua costeros en 1 metro, como respuesta del ascenso del nivel freático de la elevación en el nivel del mar en 1 metro, atribuido al efecto del cambio climático.

También se pronostica una disminución del flujo de agua dulce del 1% como consecuencia de la reducción del flujo de agua subterránea. Sin embargo, se evalúa que esta disminución de agua dulce no es suficiente para que el agua salada alcance la zona de afloramiento de los niveles freáticos de los cuerpos de agua costero, por lo que estos cuerpos de agua no son vulnerables a la intrusión salina promovida por el ascenso del nivel del mar en respuesta al calentamiento global.

Los valores de las velocidades de los flujos de agua subterráneas calculados para determinar las condiciones actuales de agua dulce de los cuerpos de agua costeros, son compatibles con las magnitudes reportadas por otros autores para sistemas costeros de la vertiente del Golfo de México.

Literatura Citada

Bear, J. 1979. Hydraulics of Groundwater. *McGraw-Hill, New*, 569 pp.

Bokuniewicz H. 1980. Groundwater seepage into Great South Bay, New York. *Estuarine and Coastal Marine Science,* 10: 437–444.

Bugna GC, Chanton JP, Cable JE, Burnett WC, Cable PH. 1996. The importance of groundwater discharge to the methane budgets of nearshore and continental shelf waters of the northeastern Gulf Mexico. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 4735–4746.

Burdon DJ. 1964. Karst groundwater investigations, Greece. *Food and Agric. Org. United Nations*, FAO/SF:2/Gre.

Cable JE, Bugna GC, Burnett WC, Chanton JP. 1996a. Application of 222Rn and CH4 for assessment of groundwater discharge to the coastal ocean. *Limnology and Oceanography* 41: 1347–1353.

Cable JE, Burnett WC, Chanton JP, Weatherly GL. 1996b. Estimating groundwater discharge into the northeastern Gulf of Mexico using radon-222. *Earth and Planetary Science Letters* 144: 591–604.

Cable JE, Burnett WC, Chanton JP. 1997a. Magnitude and variations of groundwater seepage along a Florida marine shoreline. *Biogeochemistry* 38: 189–205.

Cable JE, Burnett WC, Chanton JP, Corbett DR, Cable PH. 1997b. Field evaluation of seepage meters in the coastal marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 45: 367–375.

Contreras-Espinosa F. 1993. Ecosistemas Costeros Mexicanos. *Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad y la Universidad Autónoma Metropolitana*, 415 pp.

Day, J.W., A. Díaz de León, G. González Sansón, P. Moreno-Casasola, A. Yáñez-Arancibia. 2004. Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. Resumen Ejecutivo. En: Caso, M., I. Pisanty y E. Ezcurra (eds.). Diagnóstico ambiental del Golfo de México. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Instituto de Ecología, Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, México, D.F.*

Diaz-Delgado C., M.V. Esteller-Alberich y F. López-Vera. 2006. Recursos hídricos: Conceptos básicos y estudios de casos en Iberoamérica, *Piriguazú*,

Essaid, H. I. 1990. A multilayered sharp interface model of coupled freshwater and saltwater flow in coastal systems: Model development and application, *Water Resour. Res.*, 26, 1431– 1454.

Freeze, R.A. y J.A. Cherrey. 1979. Groundwater. *Prentice-Hall, Inc. New York.*

Gomez-Reyes, E. 1986. Modification of a Hydrodynamic and Salinity Finite Element Numerical Model for Application in Bar-Built Estuary Systems. M.S. Thesis, *Marine Science Research Center, State University of New Yorl at Stony Brook.*

Harrar, W. G., A. T. Williams, J. A. Barker, and M. V. Camp. 2001. Modelling scenarios for the emplacement of palaeowaters on aquifer systems, in Palaeowaters in Coastal Europe: Evolution of Groundwater Since the Late Pleistocene, edited by W. M. Edmunds and C. J. Milne, Spec. Publ. *Geol. Soc. London*, 189, 213– 229.

Ingebritsen, S.E. y W.E.Sanford. 1998. Groundwater in Geologic Processes. *Cambridge University Press*, 341 pp.

Lillesand, T.M. and R.W. Kiefer. 2000. Remote sensing and image interpretation. *John Wiley and Sons, New York.*

Martin, J. B., J.E. Cable, P.W. Swarzenski y M.K. Lindenberg. 2004. Enhanced Submarine Ground Water Discharge from Mixing of Pore Water and Estuarine Water. *Ground Water – Oceans Issue*, 42(7): 1000 – 1010.

MatLab. 1992. User's Guide. *The MathWorks, Inc.*

Morales J.J. 2009. Los Humedales, un Mundo Olvidado. *Centro Educativo Itzamná - Fundación José Salvador Lima Zuno - Fundación Oasis - Aerolínea Magnicharters - Unidad de Vocero del Gobierno de Quintana Roo - Universidad del Caribe.*

Ortiz-Figueroa, M y J.I. González-Navarro. 2008. El nivel del mar como indicador del cambio climático global: historia, tendencias, regiones y prespectivas en México. En Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de México, Vol. II, P. F. Martínez-Austria y A. Aguilar-Chávez (editores), *SEMARNAT, Gobierno Federal, México*, 59-72.

Remson, I., G.M. Hornerberger y F.J. Morlz. 1971. Numerical Methods in Subsurface Hydrology. *Wiley-Interscience*, 389 pp.

Roache, P.J. 1976. Computational Fluid Dynamics. *Hermosa Publishers*, 446 pp.

Todd, D.K. 1980. Groundwater Hydrology. *John Wiley & Sons.*

CAPITULO 7

Cambio climático y conflicto social: impacto económico y ambiental de la legislación en aguas

Rosario Pérez Espejo

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Investigaciones Económicas

Índice

Resumen
Abstract
Introducción
Objetivo
Metodología
Resultados y discusión
    Antecedentes: Aspectos generales de la LAN
    La LAN y los fenómenos meteorológicos extremos
    Políticas e instrumentos de la LAN
    El Programa Nacional Hídrico y el cambio climático
    El uso agrícola del agua: contaminación y daño ambiental
    Instrumentos económicos, normas, uso agrícola, contaminación y cambio climático
Conclusiones
Literatura citada

Resumen

El objetivo de la presente contribución es discutir los alcances de la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y del Programa Nacional Hídrico (PNH) en tres temas asociados al cambio climático: los fenómenos hidroclimáticos extremos, el uso del agua y su contaminación en el sector agrícola y las políticas, programas e instrumentos de la LAN que regulan estos aspectos. La LAN no menciona explícitamente al cambio climático, sino procesos que influyen o son afectados por este fenómeno. Del PNH se discuten los objetivos rectores relativos al mejoramiento de la productividad del agua en la agricultura y a la evaluación del cambio climático. La contribución se desarrolla en seis apartados que analizan los siguientes temas: 1) las disposiciones generales de la LAN donde se considera al agua un tema de seguridad nacional cuya sustentabilidad debe garantizarse; 2) los fenómenos meteorológicos extremos, 3) el uso agrícola del agua, 4) los proceso de contaminación y daño ambiental, 5) las políticas e instrumentos de la LAN sobre los temas anteriores y 6) una síntesis de tres temas que están estrechamente ligados: los instrumentos económicos y normas de la política hídrica y ambiental, el uso agrícola del agua y su contaminación y el proceso de cambio climático. A un nivel más desagregado, se discuten los objetivos rectores del Programa Nacional Hídrico relativos al mejoramiento de la productividad del agua en la agricultura y la evaluación del cambio climático. Se concluye que el sustento legal para atender los problemas relacionados con el cambio climático no se encuentran en el sector hídrico, sino en forma colateral y/o marginal y que existen vacíos legales y de normatividad en temas importantes que tienen un efecto en el cambio climático: la contaminación difusa de la agricultura y la preservación de humedales. Por último, se destaca que la política mexicana para el control de la contaminación del agua descansa en dos Normas Oficiales Mexicanas que sólo son aplicables a las descargas puntuales. La contaminación del agua por las descargas difusas de la agricultura no está regulada, por lo que es un proceso que va en aumento. Este problema se agrava por los efectos negativos previstos del cambio climático en la calidad del agua.

Abstract

This paper proposes a discussion about the scope of the National Water Law (NWL) and the National Water Program (NWP), tackling three topics linked with climate change: extreme weather events, the water use and pollution in agriculture and, the policies, programs and instruments governing these topics. Climate change is not explicitly mentioned in the NWL. NWL only deal with processes that impact or are affected by climate change. With regard to the NWP we analyze two of its main objectives: the first is related to the productivity improvement of water in agriculture and the second to the climate change assessment. The discussion is organized in six parts: 1) the general statements of NWL in which water is considered a national security subject and its sustainability must be ensured; 2) extreme weather events; 3) the agricultural use of water; 4) the pollution process and the environmental damage; 5) the policies and legal instruments of the NWL concerning these

topics and 6) a synthesis of three related topics: economic instruments and standards of environmental and hydrological policies, the agricultural use of water and its pollution, and the process of climate change. Two conclusions are found in this paper. First, the legal framework to tackle the problems related with climate change is not in the water sector, but in collateral and/or marginal way. Second, there is a lack of regulation about two important subjects, the agricultural non point pollution and the preservation of wetlands. Both have important effects on climate change. Finally, it is point out that Mexican policy for agricultural water pollution control relay on two standards, which they are only applied to point discharges. Agricultural non point discharges are not regulated therefore it is an ongoing increasing process. This problem is exacerbated due to the negative forecasted effects of climate change on water quality.

Introducción

El presente trabajo responde a la invitación a participar en el Simposio Manejo comparado de Cuencas Hidrológicas, bloque Cambio Climático y Conflicto Social, con la ponencia "Impacto económico y ambiental de la legislación en aguas"; este Simposio se realiza en el marco del XXXIV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo.

La "Legislación en Aguas" es un concepto que involucra numerosas disposiciones que sería imposible analizar en un trabajo como este; por lo tanto, en el centro de esta contribución estarán la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y el Programa Nacional Hídrico; quedan fuera del análisis el Reglamento de la LAN al cual sólo se hará referencia marginalmente, las legislaciones estatales y reglamentos estatales de aguas.

La LAN y su Reglamento no tienen referencia alguna al cambio climático (CC) como un proceso con manifestaciones y tendencias específicas que tienen efectos en el ciclo hidrológico; lo más cercano al tema en la LAN son los fenómenos meteorológicos, climatológicos o hidrometeorológicos extremos o extraordinarios, que se presentan de manera aleatoria y que conducen a emergencias hidráulicas. El tema es de especial importancia por la probabilidad de un incremento en la presencia de ciclones tropicales y de un incremento en las áreas afectadas por sequías (IPCC, 2007). De tal manera que vincular los postulados de la LAN con el cambio climático y los conflictos sociales que éste puede provocar, es un recorrido complicado que se hará en ocasiones de forma indirecta y, seguramente, parcial.

El siguiente punto sobre el cual también es necesario hacer alguna aclaración es sobre el título específico del trabajo: los impactos económicos y ambientales de la LAN, temas de tipo transversal que permean, de manera explícita o implícita la mayor parte de la LAN. Se puede decir que todos los artículos de la LAN tienen un impacto en la economía y todos lo tienen en el tema ambiental.

En este trabajo se destacarán dos temas de gran importancia que están estrechamente vinculados al CC: los usos del agua en la agricultura y las políticas de la LAN relacionadas con estos usos. Dos razones justifican esta decisión:

1. La importancia de la agricultura[1] como generadora de gases de efecto invernadero (GEI) y como usuaria mayoritaria del agua, por una parte, pero también, su importancia como receptora de los efectos del CC. Estudios realizados sobre los impactos económicos del cambio climático (Stern, 2006) señalan que las mayores consecuencias negativas de éste fenómeno tendrán lugar en los países menos desarrollados debido a que, en su mayoría, éstos ya tienen un clima cálido que seguramente se incrementará, porque la agricultura, sector en el que los impactos serán más desfavorables, es muy importante en estos países[2]

1 Entendida en su más amplia acepción como agricultura y ganadería.

2 En México, la agricultura ocupa el 65% del territorio nacional, el 77% del agua, ofrece empleo para el 18.6% de la población económicamente activa (6 millones de personas) y genera empleo para aproximadamente 25 millones de personas.

y porque las instituciones y políticas con que cuentan para hacer frente al problema son, en general, débiles. Los sectores mexicanos afectados por condiciones extremas en el clima son varios, pero todos tienen como común denominador -como es el caso de la agricultura y los bosques- los cambios en las lluvias y la humedad en el suelo (Magaña, *et al.*, 2004). Si el CC afectará mayormente a la agricultura y si en México, como en muchos otros países, este sector consume un porcentaje elevado del agua extraída, es posible rastrear los planteamientos de la LAN respecto de los usos del agua en el sector agrícola y sobre aquellos procesos –fenómenos hidroclimáticos extremos-, que se vinculan fuertemente al CC.

2. Los fenómenos presentes en el CC tienen, no exclusiva, pero sí mayoritariamente, un origen antropocéntrico; se gestan en el uso y abuso de recursos naturales y en la generación de externalidades (contaminación del aire, agua y suelos) a nivel global. La modificación de las conductas que han llevado a la situación presente requieren de la intervención de los gobiernos, también a escala global y para ello, es necesario contar, primero, con políticas (e instituciones) nacionales que permitan establecer compromisos a otra escala (Tudela, 2004). La intervención del gobierno para internalizar los daños ambientales se plasma en las políticas públicas como son la política hídrica y la política ambiental. Pero las políticas ambientales tienen enfoques diversos, escollos en su diseño e implementación y representan costos. Así como todo proceso productivo genera desechos que se acumulan en el ambiente, toda política ambiental tiene un costo que alguien debe asumir; por tal motivo, en esta contribución se pondrán de manifiesto algunos de los aspectos teóricos que subyacen en las políticas ambientales que contempla la LAN y en los costos que éstas involucran.

Esta contribución incluye en el primer apartado un breve comentario muy general sobre las características de la LAN; el segundo hace referencia a los artículos de la LAN sobre los fenómenos meteorológicos extremos; en el tercero se discuten las políticas e instrumentos de la LAN; un cuarto apartado se refiere al CC en el Programa Nacional Hídrico; el quinto apartado menciona brevemente, los artículos de los Títulos Quinto y Sexto de la LAN sobre el uso del agua y los proceso de contaminación y daño ambiental; por último, en el sexto apartado se intenta mostrar las interrelaciones que existen entre los instrumentos económicos y las normas con el uso agrícola del agua, su contaminación y el proceso de CC.

Se reconoce que un análisis más profundo de estos temas demandaría la revisión de otras leyes, entre ellas la Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente, Ley para el Desarrollo Rural Sustentable, Ley de Ingresos de la Federación, Ley Federal de Metrología y Normalización, que por acción u omisión tienen un efecto en los procesos vinculados al agua, la agricultura y el cambio climático. También necesario sería revisar los planteamientos y acciones emprendidas por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático de México. Todos estos temas rebasan los límites de esta contribución. Asimismo, quedan fuera de este análisis los cuatro artículos del Título Quinto de la LAN sobre Zonas Reglamentadas, de Veda o de

Reserva que indudablemente, tienen un propósito ambiental importante.

Las premisas de las que se parte son las siguientes:

1. La agricultura es una actividad que genera GEI que son los directamente responsables del CC; al mismo tiempo, recibe las consecuencias –previsiblemente positivas en los países del norte y negativas en los del sur-, de este proceso;

2. Los principales GEI son el dióxido de carbono, el metano y el óxido de nitrógeno; el primero tiene como fuente principal el uso de combustibles fósiles; los dos segundos la agricultura y el cambio en el uso del suelo (IPCC, 2007);
En México, la agricultura y el cambio en el uso del suelo, fundamentalmente hacia actividades agropecuarias, responden por un 14% y 18% respectivamente, de la generación de GEI (Stern, 2006);

3. La política que norma el uso, aprovechamiento y explotación del agua está regulada por la LAN, la cual tiene como uno de sus objetivos "la preservación de la cantidad y calidad de las aguas nacionales para lograr su desarrollo integral sustentable" (Artículo 1). Sin embargo, la LAN dedica una parte sustantiva de su articulado a cuestiones administrativas y contiene, de manera marginal, la regulación de los aspectos ambientales del recurso agua.

4. Las políticas de uso del agua y de atención a fenómenos hidroclimáticos extremos están señaladas en varios artículos de la LAN; sin embargo, son otras leyes (las hacendarias, por ejemplo), las que determinan la amplitud de aplicación de la LAN a éste y otros temas.

Objetivo

La presente contribución tiene por objetivo discutir los alcances de la Ley de Aguas Nacionales y del Programa Nacional Hídrico en los temas asociados al cambio climático, como son los fenómenos hidroclimatológicos extremos, los usos del agua en el sector agrícola y su contaminación y las políticas y programas que tienen una relación estrecha con estos aspectos.

Metodología

Se hace un análisis documental de Ley de Aguas Nacionales y del Programa Nacional Hídrico y se analizan las políticas e instrumentos que contienen desde la óptica de la economía ambiental.

Resultados y discusión

Antecedentes: Aspectos generales de la LAN

La LAN vigente tiene como antecedentes numerosas disposiciones legales emitidas desde la primera mitad del siglo XX. La primera versión de la Ley de Aguas Nacionales se emitió en diciembre de 1992 (SARH, 1992) y fue modificada y adicionada en abril de 2004 (SEMARNAT, 2004). La LAN vigente se divide en diez títulos:

Títulos de la Ley de Aguas Nacionales

I. Disposiciones Generales
II. Administración del Agua
III. Política y Programación Hídricas
IV. Derechos de Explotación, Uso o Aprovechamiento de Aguas Nacionales
V. Zonas Reglamentadas, de Veda o de Reserva
VI. Usos del Agua
VII. Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas y Responsabilidad por Daño Ambiental
VIII. Inversión en Infraestructura Hidráulica
IX. Bienes Nacionales a Cargo de "la Comisión"
IX. Infracciones, Sanciones y Recursos

Desde su primer artículo, la LAN postula que es una ley reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución en materia de aguas nacionales, que es de observancia general en el territorio nacional y que sus disposiciones son de orden público e interés social. Su objeto es regular la explotación, uso, aprovechamiento, distribución y control de las aguas nacionales, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.

Más de la mitad de la LAN contiene disposiciones de tipo administrativo y sólo los títulos quinto y séptimo relativos a vedas y a la prevención de la contaminación del agua, en los que también predominan las medidas administrativas, tienen un propósito ambiental.

Uno de los aspectos más sorprendentes de la LAN son las prioridades que establece para los distintos usos del agua que se incluyen en el artículo Décimo quinto Transitorio: "En tanto se cumple con lo dispuesto en el Párrafo Tercero del Artículo 22 de esta Ley, se observará el siguiente orden de prelación de los usos del agua para la concesión y asignación de la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, superficiales y del subsuelo, aplicable en situaciones normales":

Prelación de los usos del agua

1. Doméstico
2. Público urbano
3. Pecuario
4. Agrícola
5. Uso para la conservación ecológica o uso ambiental
6. Generación de energía eléctrica para servicio público
7. Industrial
8. Acuacultura
9. Generación de energía eléctrica para servicio privado
10. Lavado y entarquinamiento de terrenos
11. Uso para turismo, recreación y fines terapéuticos
12. Uso múltiple, y
13. Otros

¿Cuáles serían las razones para asignar al uso pecuario mayor prioridad que al agrícola, o al uso ambiental menor prelación que al agrícola?

La LAN se modificó en 2004, pero su reglamento es el mismo desde 1992, por lo que muchos de sus artículos quedan a un nivel general difícil de operar en la práctica.

La LAN y los fenómenos meteorológicos extremos

Estudios sobre el tema señalan que dado el clima actual, tres cuencas hidrológicas presentan vulnerabilidad en su reserva de agua: la cuenca Lerma-Chapala-Santiago, con una alta probabilidad de secarse, tanto en escenarios de una mayor lluvia con el CC y en escenarios de menor lluvia, la cuenca del Pánuco y la las cuencas interiores del Norte, éstas últimas con una vulnerabilidad baja (Mendoza *et al.* 2004).

La LAN no hace mención explícita al CC sino a fenómenos meteorológicos, climáticos o hidrometeorológicos extremos o extraordinarios que se presentan de forma casuística. Esto significa que aunque los problemas de contingencias hidráulicas tienen un espacio regulatorio, no se tienen previstas medidas de orden legal para enfrentar fenómenos persistentes de largo plazo como los asociados al CC que pueden afectar cuencas enteras.

Los fenómenos hidrometeorológicos extremos están presentes en seis artículos (3, 7, 9, 12 BIS 6, 84, 92 BIS) de cuatro Títulos (Primero, Segundo, Sexto y Octavo) que se refieren a la gestión del agua, a lo que se declara como de utilidad pública, a la operación hidráulica y a las acciones preventivas.

En el Art. 3 (Título Primero, Disposiciones Generales) de la LAN, se define el complejo proceso de gestión el agua que incluye la preservación y sustentabilidad del agua en cantidad y calidad, ante riesgos por fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios.

> ARTÍCULO 3. Para los efectos de esta Ley se entenderá por:
> XXVIII. **"Gestión del Agua"**: Proceso sustentado en el conjunto de principios, políticas, actos, recursos, instrumentos, normas formales y no formales, bienes, recursos, derechos, atribuciones y responsabilidades, mediante el cual coordinadamente el Estado, los usuarios del agua y las organizaciones de la sociedad, promueven e instrumentan para lograr el desarrollo sustentable en beneficio de los seres humanos y su medio social, económico y ambiental, (1) el control y manejo del agua y las cuencas hidrológicas, incluyendo los acuíferos, por ende su distribución y administración, (2) la regulación de la explotación, uso o aprovechamiento del agua, y (3) la preservación y sustentabilidad de los recursos hídricos en cantidad y calidad, considerando los riesgos ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios y daños a ecosistemas vitales y al medio ambiente. La gestión del agua comprende en su totalidad a la administración gubernamental del agua;

El Ejecutivo Federal puede declarar de utilidad pública (Título Segundo, Administración del Agua) la prevención y atención de los efectos de fenómenos meteorológicos extraordinarios que pongan en peligro a personas, áreas productivas o instalaciones (Art. 7, IX).

Es atribución de la Comisión Nacional del Agua (Art. 9, fracción XL) participar en el sistema nacional de protección civil y apoyar en la aplicación de los planes y programas de carácter federal para prevenir y atender situaciones de emergencia, causadas por fenómenos hidrometeorológicos extremos;

Y es atribución de los Organismos de Cuenca: (At. 12 BIS 6, fracción XXV) participar en el sistema nacional de protección civil y apoyar en la aplicación de los planes y programas de carácter federal para prevenir y atender situaciones de emergencia, causadas por fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios;

El capítulo V del Título Sexto, Usos del Agua, se refiere a la operación de la infraestructura hidráulica para el control de avenidas y protección contra inundaciones:

> **ARTÍCULO 84.** "La Comisión" determinará la operación de la infraestructura hidráulica para el control de avenidas y tomará las medidas necesarias para dar seguimiento a fenómenos climatológicos extremos, promoviendo o realizando las acciones preventivas que se requieran; asimismo, realizará las acciones necesarias que al efecto acuerde su Consejo Técnico para atender las zonas de emergencia hidráulica o afectadas por fenómenos climatológicos extremos, en coordinación con las autoridades competentes.
> Para el cumplimiento eficaz y oportuno de lo dispuesto en el presente Artículo, "la Comisión" actuará en lo conducente a través de los Organismos de Cuenca.
> *(Artículo reformado DOF 29-04-2004)*

Por último, en el Título Octavo relativo a la Inversión en infraestructura hidráulica, se menciona la obra pública que se consideran necesaria:

> **ARTÍCULO 96 BIS 2.** Se consideran como obras públicas necesarias que competen al Ejecutivo Federal a través de "la Comisión", las que:
> **III.** Controlen, y sirvan para la defensa y protección de las aguas nacionales, así como aquellas que sean necesarias para prevenir inundaciones, sequías y otras situaciones excepcionales que afecten a los bienes de dominio público hidráulico; sin perjuicio de las competencias de los Gobiernos Estatales o Municipales;

Seis artículos dispersos en cuatro de los diez títulos en que se divide la LAN, dan cuenta de la acción pública en relación con los efectos hidroclimáticos extremos, la mayoría de ellos, producto del cambio climático. La importancia y las experiencias traumáticas de nuestro país en este tema, se reflejan en una serie de medidas puntuales, que pueden o

no cumplirse, del Programa Nacional Hídrico.

Políticas e instrumentos de la LAN

La política y programación hídricas están contenidas en el Título Tercero de la LAN que divide su contenido en dos grandes secciones, la primera dedicada a la Política Hídrica Nacional y la segunda a la Planificación y Programación Hídricas.

La Política Hídrica Nacional se circunscribe a dos artículos, el 14 BIS 5 que describe los principios generales de esa política y el 14 BIS 6 donde se exponen sus instrumentos.

De los 22 principios generales del artículo 14 BIS 5 que sustentan a la política hídrica –incumplidos varios de ellos-, cabe destacar aquellos que tienen una relación estrecha con las sustentabilidad y con la satisfacción del derecho humano y ciudadano al agua (Fundación Nueva Cultura del Agua, 2005), éste último en el inciso XXII:

Algunos principios generales de la Política Hídrica Nacional
(sustentabilidad y derecho al agua)

X: "...la conservación, preservación, protección y restauración del agua en cantidad y calidad es asunto de seguridad nacional y debe evitarse el aprovechamiento no sustentable y los efectos ecológicos adversos";
XI: "La gestión integrada se sustenta en el uso múltiple y sustentable de las aguas y la interrelación que existe entre los recursos hídricos con el aire, el suelo, flora, fauna, otros recursos naturales, la biodiversidad y los ecosistemas vitales para el agua;
XII Donde se reconoce que "El agua proporciona servicios ambientales que deben reconocerse, cuantificarse y pagarse, en términos de Ley";
XVI Da categoría de ley al principio "el que contamina paga" y que establece que "Los usuarios del agua deben pagar por su explotación, uso o aprovechamiento bajo el principio de "usuario-pagador" de acuerdo con lo dispuesto en la Ley Federal de Derechos" y
XXII: "El uso doméstico y el uso público urbano tendrán preferencia en relación con cualesquier otro uso"

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente (LGEEPA), por ejemplo, contiene un capítulo (el IV) dedicado a los Instrumentos de la Política Ambiental, entre los cuales incluye a los instrumentos económicos (Sección III) definidos como los "mecanismos normativos y administrativos de carácter fiscal, financiero o de mercado mediante los cuales las personas asumen los beneficios y costos ambientales que conlleven sus actividades económicas, incentivándolas a realizar acciones que favorezcan el ambiente" (Art. 22). Asimismo, la Sección VI se refiere a las Normas Oficiales Mexicanas y su importancia en la instrumentación de la política ambiental.

La LAN carece de todo señalamiento explícito acerca de los instrumentos económicos y las normas que son, en la práctica, herramientas imprescindibles de la política hídrica.

Para la LAN, los instrumentos básicos de la política hídrica son (Art. 14 BIS 6):

Instrumentos de la Política Nacional Hídrica

1) La planificación hídrica;
2) El régimen de concesiones, asignaciones y permisos para la explotación, uso o aprovechamiento del agua y bienes nacionales, incluyendo los permisos de descarga;
3) La gestión de aguas nacionales
4) El cobro de derechos causados por la explotación, uso o aprovechamiento, descarga y protección del agua;
5) La participación de las organizaciones de la sociedad y de los usuarios en el desarrollo de actividades específicas;
6) La prevención, conciliación, arbitraje, mitigación y solución de conflictos en materia del agua y su gestión;
7) Los apoyos sociales para que las comunidades rurales y urbanas marginadas accedan al agua y al saneamiento, y
8) El Sistema Nacional de Información sobre cantidad, calidad, usos y conservación del Agua[3].

Algunos de los instrumentos señalados, como son la participación social o la prevención, conciliación, arbitraje, mitigación y solución de conflictos, constituyen más una estrategia del sector que un instrumento. Los instrumentos económicos de la LAN son el cobro de derechos (un tipo de impuesto) y los apoyos sociales (un tipo de subsidio), aunque no se les reconozca como tales. Las Normas Oficiales Mexicanas, otro importante instrumento económico son mencionadas a lo largo del articulado de la LAN, como algo que debería regular diversos aspectos, pero que todavía no se emiten.

A la Planificación y Programación Hídrica, los instrumentos básicos de la política nacional hídrica, se les dedica un solo artículo que establece diversos aspectos administrativos de estos procesos. En forma sucinta, los elementos de la planeación y programación del agua son los siguientes:

Planificación y Programación Hídrica

Artículo 15. La planificación hídrica es de carácter obligatorio para... la conservación de recursos naturales, ecosistemas vitales y el medio ambiente. Su formulación, implantación y evaluación incluye:
I. El Programa Nacional Hídrico;
II. Programas Hídricos para cada una de las cuencas hidrológicas o grupos de cuencas hidrológicas en que se constituyan Organismos de Cuenca y operen
III. Los subprogramas específicos, regionales, de cuencas hidrológicas, acuíferos, estatales y sectoriales;
IV. Programas especiales o de emergencia;

3 Artículo adicionado DOF del 29-04-2004

V. La integración y actualización del catálogo de proyectos para el uso o aprovechamiento del agua y para la preservación y control de su calidad;
VI. La clasificación de los cuerpos de agua de acuerdo con los usos... y la elaboración de balances hídricos;
VII. Las estrategias y políticas para la regulación de la explotación, uso o aprovechamiento del agua y para su conservación;
VIII. Los mecanismos de consulta, concertación, participación y asunción de compromisos entre usuarios y la administración pública federal, estatal o municipal;
IX. Los programas multianuales de inversión y operativos anuales, y
X. La programación hídrica respetará el uso ambiental o de conservación ecológica, la cuota natural de renovación de las aguas, la sustentabilidad hidrológica de las cuencas hidrológicas y de ecosistemas vitales y contemplará la factibilidad de explotar las aguas del subsuelo en forma temporal o controlada.
(Artículo reformado DOF 29-04-2004)

El Programa Nacional Hídrico y el cambio climático

De acuerdo con la LAN el Programa Nacional Hídrico (CONAGUA, 2008) es el instrumento básico de la política del agua[4]; no obstante, el Programa Nacional Hídrico (PNH) es un instrumento de tipo general que no especifica sectores económicos, espacios geográficos e instrumentos específicos para el logro de sus objetivos y la aplicación de sus estrategias. Los objetivos rectores del PNH que son de interés en este trabajo son la mejoría de la productividad del agua en el sector agrícola, la prevención de riesgo derivados de y la evaluación de los efectos del cambio climático. Se dejará de lado lo referente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos, que como ya se mencionó, comprenden un conjunto de importantes acciones para su prevención.

Objetivos rectores del Sector Hidráulico

1. Mejorar la productividad del agua en el sector agrícola.
2. Incrementar el acceso y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
3. Promover el manejo integrado y sustentable del agua en cuencas y acuíferos.
4. Mejorar el desarrollo técnico, administrativo y financiero del Sector Hidráulico.
5. Consolidar la participación de los usuarios y la sociedad organizada en el manejo del agua y promover la cultura de su buen uso.
6. Prevenir los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos y atender sus efectos.
7. Evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico.
8. Crear una cultura contributiva y de cumplimiento a la Ley de Aguas Nacionales en materia administrativa.

4 Sus antecedentes son el Programa Nacional Hidráulico 2001-2006 y el Programa Hidráulico 1995-2000. Antes existieron varios Planes Nacionales Hidráulicos.

Objetivo 1: Mejorar la productividad del agua en el sector agrícola.

El objetivo número uno, mejorar la productividad del agua en el sector agrícola contiene siete estrategias que ignoran dos problemas importantes: el efecto del CC en el sector y la contaminación agrícola del agua. La palabra contaminación no aparece nunca en este objetivo.

Estrategias Mejorar la productividad del agua en el sector agrícola

1: Modernizar la infraestructura hidroagrícola y tecnificar las superficies agrícolas en coordinación con usuarios y autoridades locales.
2: Incentivar el intercambio de agua de primer uso por agua residual tratada
3: Promover que los volúmenes concesionados estén acorde con la disponibilidad sustentable de las fuentes de abastecimiento.
4: Mantener en condiciones adecuadas de funcionamiento las presas administradas por la CONAGUA.
5: Impulsar el desarrollo y consolidación de las organizaciones de usuarios agrícolas.
6: Promover la reconversión cultivos en función de la disponibilidad de agua y propiciar su valoración económica en el riego
7: Ampliar la frontera agrícola de riego y temporal tecnificado en zonas con disponibilidad de agua previo ordenamiento territorial.

Las siete estrategias del mejoramiento de la productividad del agua se basan en 13 "indicadores", por ejemplo el número de hectáreas modernizadas, la superficie en distritos de riego regada con agua residual tratada (hectáreas), el número de hectáreas incorporadas al riego, o bien, indicadores administrativos como distritos de riego que cuentan con títulos de concesión modificados, pero en ningún caso se especifican instrumentos, ni espacios geográficos. Es posible que este nivel de desagregación se encuentre en los programas por cuenca o por subcuenca que no fueron revisados en este trabajo.

Objetivo 7. Evaluación de los efectos del cambio climático

El Programa Nacional Hídrico (PNH) reconoce que el proceso de CC, generado por la concentración de GEI, especialmente bióxido de carbono, que supera la capacidad de captura de la biosfera, es uno de los desafíos que enfrenta la humanidad.

Una de las consecuencias de este fenómeno es la probabilidad de que se eleve aún más la temperatura media global, lo que puede provocar una disminución en las lluvias y por tanto en los escurrimientos de los cauces, los almacenamientos de las presas y la recarga de los acuíferos, afectando la disponibilidad de agua para las ciudades, las industrias, el riego y la generación de energía eléctrica.

El PNH plantea que la calidad del agua podría empeorar debido a una mayor temperatura que favorecería la proliferación de diversos microorganismos y malezas acuáticas. Otras consecuencias que se mencionan son el incremento en el nivel del mar por dilatación térmica de los océanos y por el derretimiento de los hielos polares y la migración de la interfase salina hacia tierra adentro, al alterarse el equilibrio entre el agua marina y el agua dulce.

A partir de este escueto diagnóstico, el PNH propone una serie de acciones y estudios a realizarse en un futuro no determinado de la presente administración; varias de estas acciones y estudios se repiten en el objetivo 6, prevención de riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos,

Los estudios futuros del Programa Nacional Hídrico

1. Modelos de escala regional para evaluar los efectos del CC;
2. Impacto del CC en la evapotranspiración potencial, el grado de vulnerabilidad y la intrusión salina en acuíferos; en los cambios en los eventos extremos;
3. Mapas de riesgo asociados al incremento del nivel del mar, el cambio de régimen de lluvia y su impacto en la infraestructura hidráulica;
4. Evaluación de tendencias en términos de precipitación, escurrimiento, almacenamiento de las presas, recarga de acuíferos y calidad de agua;

Las acciones futuras del Programa Nacional Hídrico

1. Mantener la biodiversidad de nuestro país;
2. Identificar zonas inundables por el incremento del nivel del mar;
3. Reubicaciones de asentamientos humanos, en su caso;
4. Construcción de las obras de protección que correspondan;
5. Información sistemática a la población sobre los efectos del CC y la manera en que se pueden preparar para disminuir sus efectos y,
6. Evaluación de acciones realizadas en otras naciones para adaptar las que se consideren más convenientes

Para el objetivo evaluación del cambio climático se proponen tres estrategias con metas cuantificables para el período 2007-2012; se mencionan las instituciones y organizaciones involucradas en el objetivo (trece instituciones y dependencias del gobierno federal, más institutos de investigación y universidades e institutos de enseñanza superior sin especificar) y los retos a superar para alcanzar las metas previstas.

Las estrategias incluyen ocho indicadores:

Estrategia 1. Evaluar los efectos del CC en las variables del ciclo hidrológico

1. Integración de información sobre efectos del CC en las variables del ciclo hidrológico (%)
2. Estudios de caracterización del CC a escala nacional, con base en modelos numéricos (incluye calibración)

Estrategia 2: Medir y evaluar los parámetros que inciden en el CC

3. Instrumentar un sistema de medición de las variables climáticas y del ciclo hidrológico que inciden en el cambio climático
4. Instalar un observatorio de medición de composición química de la atmósfera y densidad de aerosoles, como aportación a la red mundial

Estrategia 3: Promover y apoyar la investigación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, en materia de medidas de adaptación ante el CC

5. Estudios sobre caracterización de las regiones del país en función del CC
6. Estudio sobre el impacto del CC en la evapotranspiración potencial a nivel mundial
7. Estudios sobre vulnerabilidad, escenarios, posibles impactos y opciones de solución a la intrusión salina en acuíferos
8. Estudios sobre las posibles variaciones en el comportamiento de eventos extremos

Los principales retos a superar asociados al objetivo son los siguientes:

Retos

1. Desarrollar la capacidad técnica en las diferentes instituciones que permita precisar los efectos asociados al cambio climático en el Sector Hidráulico.
2. Incrementar el intercambio de información y resultados con las diferentes instancias nacionales e internacionales para evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico.
3. Crear conciencia entre la población sobre la importancia y efectos del cambio climático.
4. Definir e implantar los programas y acciones necesarios para afrontar el cambio climático.

Se puede observar que el objetivo sobre CC se limita, fundamentalmente, a estudios a realizarse y que los retos no se transforman ni en estrategias del PNH ni en indicadores; simplemente quedan como retos cuya superación está indefinida.

El PNH no da un orden de prelación a sus estrategias en relación con el uso del agua,

no especifica cuáles destinos del agua -para las ciudades, las industrias, el riego o la generación de energía eléctrica- tendrían acciones prioritarias, como tampoco se puede saber, que actores o grupos de actores estarán a cargo de estas acciones. El PNH no permite conocer ni las acciones ni las estrategias ni los actores involucrados para en cada uno de los sectores afectados.

5. Uso agrícola del agua: contaminación y daño ambiental en la LAN

El uso agrícola del agua (capítulo II del Título Sexto: usos del agua) contiene cinco secciones que corresponden a disposiciones generales (I), ejidos y comunidades (II), unidades de riego (III), distritos de riego (IV) y temporal tecnificado (V). Los 30 artículos que incluye el capítulo de uso del agua en la agricultura son administrativos y establecen derechos, requisitos, organización, reglamentación y gestión del agua en las diferentes figuras asociativas contempladas en este capítulo de la LAN. No existe en ninguno de los artículos de este capítulo referencia alguna a los problemas ambientales que se generan al usar el agua en la agricultura.

La LAN dedica el Título Séptimo, Prevención y control de la contaminación de las aguas y responsabilidad por daño ambiental, a los efectos ambientales de los usos del agua sin especificar sectores (artículos 85 al 98). Algunos de los postulados de los artículos del capítulo I sobre prevención y control de la contaminación del agua, se ponen en operación mediante las Normas Oficiales Mexicanas 001 y 002 que establecen límites máximos de contaminantes para las descargas de aguas residuales a cuerpos de agua y terrenos de la nación. La preservación de humedales, sistemas que tienen un efecto importante en el cambio climático, aún no tiene un sistema de normas[5] que haga posible el cumplimiento del artículo 86 BIS 1.

Varios de los artículos del título sobre prevención y control de la contaminación (artículos 86 BIS 1, 86 BIS 2, 87, 88, 88 BIS, 92) se violan flagrantemente, tanto por parte de los usuarios, como por parte de la autoridad ambiental que puede ser la CNA o los Consejos de Cuenca.

El incumplimiento deriva de la falta de normatividad para aspectos que la LAN considera deben estar bajo el sistema de norma oficial mexicana, como son los casos de las descargas de aguas residuales de uso doméstico que no forman parte de un sistema municipal de alcantarillado (Art. 88 BIS 1), la infiltración de aguas residuales para recargar acuíferos, (Art. 91) y las descargas de aguas residuales por uso doméstico y público urbano que carezcan o que no formen parte de un sistema de alcantarillado y saneamiento (Art. 91 BIS).

5 Tampoco tiene norma la infiltración de aguas residuales para recargar acuíferos, que según la LAN debe ajustarse a las normas oficiales mexicanas.

Por último, el único artículo que en particular se refiere a las zonas de riego sujetas a contaminación difusa, también deja a una normatividad inexistente respecto a la compatibilidad entre el uso del suelo (donde se aplican sustancias contaminantes cuando el uso es agrícola), el uso del agua y la preservación de la calidad de éstas (Art. 96).

La agricultura, y en particular la de zonas de riego, contribuye en forma importante, pero no documentada en México[6], a la contaminación del agua y, en parte, a la generación de GEI por cultivos como el arroz, la aplicación de fertilizantes, Etc. La generación de GEI por la agricultura tiene un impacto menor en el CC que la producción de metano por las ganaderías intensivas; pero este tema queda fuera de una legislación cuyo objeto es el recurso agua.

Respecto de la responsabilidad por daño ambiental, sólo dos artículos generales que no especifican sectores o actividades que lo producen, el artículo 96 BIS establece que la autoridad del agua (sea la CNA o el Organismo de Cuenca) intervendrá para que el responsable cumpla con la reparación del daño ambiental y el 96 BIS 1 señala que el responsable del daño tendrá que remover los contaminantes y, si esto no fuera posible, pagar una indemnización que fijaría la autoridad competente.

Los planteamientos de la LAN sobre uso agrícola del agua y daño ambiental no están vinculados; tampoco lo están en el reglamento de la LAN, ni en el Programa Nacional Hídrico. Las normas oficiales mexicanas, que desde 1996 dejaron de ser por giro de la actividad económica para convertirse en normas genéricas aplicables a todos los usuarios de aguas y terrenos nacionales, regulan la aplicación del agua residual generada por descargas puntuales a los suelos para uso agrícola, pero no hay normas para las descargas difusas de la agricultura.

Instrumentos económicos, normas, uso agrícola, contaminación y cambio climático

La LAN y el PNH, tocan tres aspectos de manera aislada, que en el mundo real, no en el administrativo y legal, tienen una estrecha vinculación; estos son el uso del agua en la agricultura, su contaminación y los instrumentos económicos y normas como instrumentos de la política hídrica diseñados para mitigar el problema y, por supuesto, su ponderación en el CC.

El informe Stern y otros estudios señalan que el CC afectará en mayor medida al sector agrícola por los cambios en el régimen de lluvias; este sector que es el principal usuario del agua y una de las fuentes de contaminación más importantes del recurso y menos atendida por las autoridades. Asimismo, señala que el costo de mitigar y controlar los efectos actuales del CC representa un porcentaje del PIB mucho menor que el costo de los efectos futuros en caso de no actuar y, para actuar se requieren políticas a nivel global, nacional y local y

6 La EPA (*Environmental Protection Agency*) informó que en 1994 el 72% de los ríos y el 58% de los lagos evaluados tenían como fuente de su deterioro a la agricultura; en el 26% de los ríos se encontraron pesticidas; en el 40% de los lagos y 37% de los ríos había nutrientes y en el 40% de ríos y lagos, enriquecimiento por materia orgánica (USEPA, 2000).

voluntad política.

En México, el nivel más desagregado de la política ambiental en materia de contaminación del agua está representado por las Normas Oficiales Mexicanas 001 y 002 que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a terrenos y bienes de la nación, la primera y al alcantarillado público la segunda, ambas expedidas en 1996. Estas normas están vinculadas al pago de un derecho por incumplimiento que es, también un importante instrumento económico.

En el esquema de la economía ambiental, las normas son uno de los instrumentos del enfoque directo o de "comando y control" de la política ambiental; el otro enfoque es el indirecto o de mercado donde se incluyen impuestos, subsidios, creación de mercados y otros (Figura 1). El enfoque regulatorio propone dos opciones que el contaminador seleccionará en función del costo de mitigación y del pago del derecho. Los contaminadores para los cuales el costo de control es muy alto preferirán pagar el derecho y aquellos con un bajo costo optarán por instalar equipo de tratamiento. Las normas otorgan un derecho *de facto* a contaminar hasta cierto nivel, con base en la capacidad de asimilación del cuerpo de agua, las tecnologías de tratamiento y su costo.

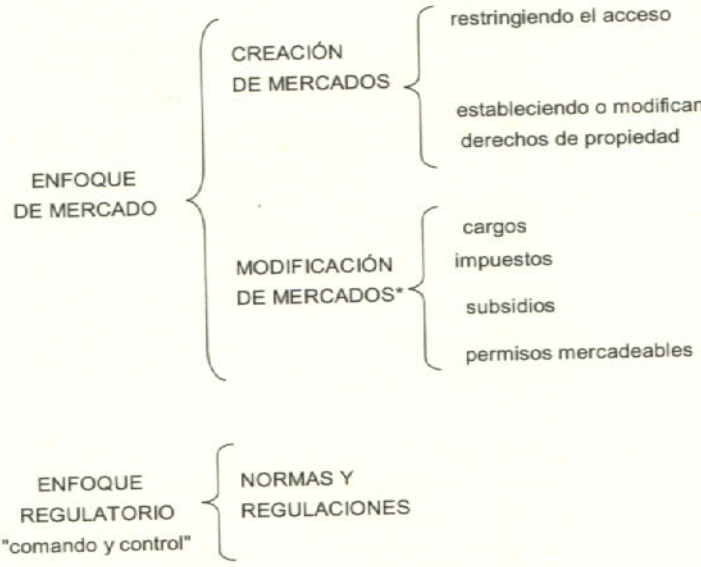


Figura 1 Enfoques de la política ambiental (de acuerdo a Turner *et al.*, 1994)

Desde el punto de vista de la economía, las normas representan un sistema de control de contaminación ineficiente por las siguientes razones:

Ineficiencias del enfoque regulatorio

- Requiere recursos de la agencia reguladora en información que los contaminadores poseen. Se supone que los contaminadores conocen mucho mejor que el gobierno el costo de abatimiento de una emisión contaminante
- El cumplimiento es sobre un determinado estándar sujeto generalmente a un tipo de tecnología, por ejemplo, "la mejor tecnología de control disponible"[7], o a otras tecnologías de "fin de tubería"
- Los costos de control para no rebasar los mínimos permitidos serán diferentes para cada contaminador,
- Una vez establecida una regulación no existe ningún incentivo para reducir la contaminación por debajo de los límites que establece,
- Las opciones técnicas son limitadas y puede haber sesgos en las soluciones tecnológicas hacia la investigación y el desarrollo de alternativas de fin de tubería, lo que puede crear un cierto conflicto entre el desarrollo tecnológico, el ambiente y la competitividad.

Sin embargo, a pesar de estas ineficiencias, los sistemas de control de contaminación generada por descargas puntuales en funcionamiento en los países industrializados y en varios países en desarrollo, se basan en normas.

Los problemas que ha enfrentado la normatividad sobre descargas puntuales en nuestro país es que las normas 001 y 002, no han sido revisadas, como lo establece la Ley Federal de Metrología y Normalización, tampoco han sido evaluadas[8], se des conoce el impacto de las normas 001 y 002 en la calidad del agua y su vigilancia es insuficiente.

El proceso de normalización tiene entre sus características ser participativo y sustentarse en un análisis de costo beneficio. Para el caso de la norma 001 se consideraron dentro de los costos públicos a las inversiones en plantas de tratamiento municipales y en los costos privados, las inversiones en sistemas de tratamiento en cinco ramas de la industria: producción de petróleo, hierro y acero, azúcar, celulosa y papel y química. Entre los beneficios esperados se supuso una reducción de la mortalidad y morbilidad por contar con una mejor calidad de agua y un incremento en los ingresos por cambios en el patrón de cultivos en dos distritos de riego. La tasa de descuento se fijó en 11% (Rojas *et al.*, 1997)

Más allá del cuestionamiento ético sobre la asignación de valores económicos a la vida humana y de las estimaciones optimistas respecto del cambio en el patrón de cultivos y la reducción de la morbilidad, los costos de la norma 001 suponen un tratamiento secundario[9] que no es suficiente para la descarga de varias actividades productivas; por ejemplo, la producción de cerdos que requiere un tratamiento terciario para no rebasar

7 Sus siglas en inglés BAT, Best Availabe Technology
8 El costo y cumplimiento de la NOM 001 fueron evaluados para el sector porcino (Pérez, 2006)
9 Tratamientos físicos o una combinación de tratamientos biológicos con físicos.

los parámetros de la norma, lo que hace que la norma sea más cara para estos sectores.

En el sector agropecuario, la norma 001 sólo es aplicable a las ganaderías intensivas que generan descargas puntuales, pero quizá, como en el caso de la porcicultura, no sea viable económicamente; el resto del sector agrícola genera descargas difusas.

Tratar con fuentes difusas de contaminación del agua es un problema todavía más complicado, incluso para los países desarrollados. Los costos de vigilancia y monitoreo de las descargas difusas son mucho más elevados que para las descargas puntuales por el número y diversidad de contaminadores y los instrumentos económicos que tradicionalmente se han empleado para controlar las descargas puntuales, no son aplicables a las difusas porque estas descargas no son observables, no son cuantificables, no es posible identificar al responsable de la descarga y, por consiguiente no se pueden monitorear.

Los instrumentos óptimos, desde el punto de vista económico, para el control de la contaminación difusa requieren de información abundante y suponen altos costos de transacción y de observancia obligatoria; por lo tanto, el manejo de la calidad del agua en la agricultura opera en un mundo de instrumentos subóptimos y de iniciativas voluntarias, porque la aplicación de cualquier instrumento en la realidad, enfrenta numerosos escollos, incluso en países industrializados. (Aguilar Ibarra y Pérez Espejo, 2008).

El control de las descargas difusas de la agricultura no sólo enfrenta retos metodológicos en el diseño de instrumentos, sino también políticos e institucionales porque la agricultura se considera un sector prioritario que produce alimentos, porque los subsidios a la producción agrícola tienen un impacto negativo en el ambiente, particularmente en el recurso agua, y porque los productores hegemónicos en el agronegocio, han sido tradicionalmente renuentes a ser regulados ambientalmente (Shortle y Abler, 2001). A estos problemas el CC agrega la posibilidad de un incremento en la contaminación por elevación de temperatura que incentiva la proliferación de microorganismos patógenos y malezas.

Conclusiones

La LAN no hace referencia explícita al cambio climático; únicamente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos que, aparentemente, cada vez más están vinculados al cambio climático. Además de los fenómenos hidroclimáticos, otros temas de la LAN relacionados con el cambio climático son la contaminación y el daño ambiental, el uso del agua en la agricultura (por los efectos que genera y los impactos que recibe del cambio climático), las vedas y la política hídrica sobre estos aspectos.

Varios de los artículos de la LAN que tienen que ver con la sustentabilidad del recurso agua, señalan instrumentos como el pago de servicios ambientales, con el principio "el que contamina paga" y las normas oficiales mexicanas, que en la práctica sólo se han puesto en marcha de manera marginal. Los instrumentos económicos, fundamentales

para hacer operativa la política hídrica, no se mencionan en la LAN

En un nivel más desagregado, el Programa Nacional Hídrico contiene como objetivos rectores el mejoramiento en la productividad del agua en la agricultura y la evaluación del cambio climático. El Programa aún es muy general y no señala prioridades, sectores, instrumentos ni espacios geográficos para su consecución.

Los instrumentos que en la práctica operan para mejorar la calidad del agua y sus fuentes de abastecimiento son el pago por servicios ambientales (en el sector forestal, no en el hídrico), el pago de derechos por el uso de cuerpos de agua y terrenos de la nación y las normas 001 y 002 sobre descargas puntuales de aguas residuales.

Temas importantes en el cambio climático, como son la preservación de humedales y la contaminación difusa en las zonas de riego, carecen de normas y de otros instrumentos regulatorios, no obstante que la LAN señala su necesidad.

Los planteamientos de la LAN, de su Reglamento y del Programa Nacional Hídrico sobre uso agrícola del agua y daño ambiental están desvinculados y, por tanto, la calidad de agua que se verá afectada negativamente por el cambio climático sólo cuenta con dos normas oficiales mexicanas no viables económicamente en todos los sectores productivos y de escasa vigilancia.

El andamiaje legal para atender los problemas relacionados con el cambio climático no se encuentra en el sector hídrico, sino de manera colateral y/o marginal, aún cuando sectores como la agricultura, particularmente la de riego, son muy importantes en los procesos de cambio climático.

Literatura citada

Aguilar Ibarra, A., Pérez Espejo, R.H. 2008. La contaminación agrícola del agua en México: retos y perspectivas. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía* 39,2008, 205-215.

CONAGUA, 2008. *Programa Nacional Hídrico 2007-2012.* Comisión Nacional del Agua, *Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales, Mexico D.F. 193 p* www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/

Fundación Nueva Cultura del Agua, 2005. Declaración Europea por una Nueva Cultura del Agua. Madrid 18 de febrero de 2005

IPCC Intergovernmental Panel on Climat Change, 2007. Climate Change: The Physical Science Basis. Summary for Policemakers. Paris.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Fourth Assessment Report (AR4) www.ipcc.ch

Magaña, Víctor, Méndez Juan M., Morales Rubén y Millán Cecia (2004) "Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México" en Cambio climático: una visión desde México. Juana Martínez y Adrián Fernández, Coordinadores. INE, SEMARNAT. México

Mendoza, Víctor M., Villanueva, Elba E., Maderey, Laura E., 2004. Vulnerabilidad en el recurso agua de las zonas hidrológicas de México ante el cambio climático global. en Cambio climático: una visión desde México. Juana Martínez y Adrián Fernández, Coordinadores. INE, SEMARNAT. México.

Pérez Rosario, 2006. Costs of the wastewater standard in pig production in Mexico. *Environment, Development and Sustainability, N°* 8, 2006, 391-411.

Rojas, F., Serhan, G., Volantin, S., 1997. Análisis costo-beneficio de la norma obligatoria para las descargas de aguas residuales a cuerpos nacionales. *Ingeniería Hidráulica en México.* Vol. XII, Num.1, pp. 27-40

SARH, 1992. Ley de Aguas Nacionales. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Diario Oficial de la Federación. 1 de diciembre de 1992, México D.F. 22-46

SEMARNAT, 2004. Ley de Aguas nacionales. Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 20 de abril de 2004, México D.F. 25-97

Shortle J.S. y Abler, D., 2001. Environmental Policies for Agricultural Pollution Control. CABI UK. 224 p.

Stern Nicholas, 2006. Stern Review on the Economics of Climate Change. United Kingdom Government, The National Archives (www.nationalarchives.gov.uk)

Tudela, Fernando, 2004. México y la participación de los países en desarrollo en el régimen climático. En: Cambio climático una visión desde México. Juana Martínez y Adrián Fernández, Coordinadores. INE, SEMARNAT. México.

Turner, K., Pearce, D., Bateman, 1994. *Environmental Economics.* Editorial Harvester Wheatsheaf, London 328 p

USEPA (2000) *The Quality of our Nation's Waters: A summary of the National Water Quality.* US EPA Office of Water. EPA-841-5-00-001, Washington USA

CAPITULO 8

Estrategias de potabilización de aguas contaminadas

Alejandra Martín Domínguez, Juana Enriqueta Cortés Muñoz, Laura Quezada Jiménez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Índice

Resumen
Abstract
Introducción
Objetivo
Metodología
Resultados
    Opciones de tratamiento
    Clarificación convencional y filtración directa
    Membranas
    Oxidación avanzada
    Adsorción
    Electroquímicos
Conclusiones
Literatura citada

Resumen

El aumento global de temperatura es un fenómeno que tiene clara influencia en el ciclo hidrológico y por tanto en los volúmenes de líquido que potencialmente se tendrían disponibles para las diferentes actividades humanas; dicha disponibilidad debe ser vista no sólo en términos de la cantidad sino también de su calidad, definida ésta por una serie de parámetros físicos químicos y microbiológicos. Algunos de estos parámetros se encuentran regulados en la normativa nacional, en tanto que otros, aunque se reconoce que pueden tener efectos adversos para la salud pública y la vida silvestre, no han sido considerados, tal es el caso de los llamados contaminantes emergentes, los cuales están siendo constantemente liberados al ambiente y son difícilmente removidos por los procesos convencionales de tratamiento y de potabilización. El objetivo del presente documento es describir la problemática a la que se enfrenta el tratamiento de agua para el abastecimiento público, y describir las opciones que existen para tratar los contaminantes que se espera que el cambio climático acentúe en nuestros cuerpos de agua. Con este motivo se describen de manera general diferentes tecnologías de potabilización y desinfección, su posible aplicación, limitaciones y costos, mencionando los resultados obtenidos en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua con algunas de ellas en aplicaciones específicas.

Abstract

The global increase in temperature is a phenomenon which has clear influence in the hydrological cycle and therefore in the volumes of fluid potentially would be available for different human activities; such availability should be seen not only in terms of quantity, but also of its quality, it defined as a series of chemical, microbiological and physical parameters. Some of these parameters are regulated in the national legislation, while others, even though recognizing that they may have adverse public health and wildlife, have not been considered, this is the case of emerging contaminants so-called, which are constantly being released to the environment and are hardly removed by conventional treatment and purification processes. This document aims to describe the problem that faces up to the treatment of water for public supply and describe the options that exist to deal with pollutants expected climate change step up our water bodies. On this occasion describes generally different technologies of purification and disinfection, its possible implementation, constraints and costs, mentioning the results of the Institute Mexican technology of water with some of them in specific applications.

Introducción

El aumento de la temperatura durante el siglo 20 está bien documentada en el ámbito global y regional (Bates, 2008). Varios aspectos del ciclo hidrológico se ven afectados por este cambio en la temperatura, por ejemplo: la precipitación, la evaporación, la descarga de ríos, el derretimiento de glaciares con el consecuente aumento del nivel del mar y la recarga de acuíferos, entre otros. No obstante la importancia que la calidad del agua tiene en el bienestar de la población; por ejemplo, está comprobado que la cantidad y calidad del agua son factores asociados con la incidencia de enfermedades infecciosas gastrointestinales (Stevens, *et al.*, 2008) y, que el agua de consumo contaminada con arsénico se asocia con problemas cardiovasculares y cáncer (ATSDR, 2000; IARC, 2004), comparada con la cantidad de agua, la investigación de los impactos del cambio climático sobre la calidad del agua es muy limitada, ya que generalmente las relaciones entre la calidad del agua y cambio del clima son difíciles de establecer y, por esa razón no se incorporan en los modelos actualmente utilizados (Senhorst y Zwolsman, 2005). Esto no significa que los efectos no sean importantes, sino que éstos no son reconocidos todavía (Senhorst y Zwolsman, 2005).

Los cambios en la calidad del agua se relacionan con diversos factores: hidrológicos (menor dilución de los contaminantes durante flujos bajos de los ríos o bien, mayor arrastre de contaminantes en las zonas agrícolas durante las tempestades); terrestres (cambios en la vegetación y la estructura del suelo) y de uso (aumento de la demanda en todos los sectores de la sociedad) (Senhorst y Zwolsman, 2005).

El aumento de los períodos con sol durante el verano puede incrementar la evaporación y reducir las fuentes de agua disponible (Martín *et al.*, 2007). La disminución de los niveles de los cuerpos de agua trae como consecuencia el aumento de la concentración de los contaminantes que se descargan en ellos, la re-suspensión de sedimentos (Kundzewicz *et al.*, 2007), y contribuye al florecimiento de cianobacterias conocidas como algas azul-verde (Meuleman *et al.*, 2007). Estos organismos son bacterias que forman una capa de tintes azul-verde en la superficie del agua y son motivo de preocupación porque producen sustancias tóxicas (cianotoxinas) que son hepatotóxicas, neurotóxicas y pueden causar enfermedades gastrointestinales (Water UK, 2006) cuando se consume agua que contenga cianotoxinas. La Organización Mundial de la salud (OMS) fija como valor guía para la toxina microcistina en el agua potable, 1 ug/L y, para aguas de uso recreativo, 20 ug/L (Westrick, 2005a; Westrick, 2005b), esta biotoxina es producida por los géneros *Microcystis, Anabaena, Planktothrix, y Oscillatoria* (Rantala *et al.*, 2004).

Un ejemplo de la variación de la calidad con el nivel de los cuerpos de agua se representa en las Figuras 1 y 2, en donde se observa que la variación de los sólidos disueltos totales (SDT) y los sólidos suspendidos totales (SST) durante los años 1990 a 2006 está en función del nivel del agua, y la concentración de arsénico está en función del volumen almacenado en el Lago de Chapala, el cual es el más grande de la República Mexicana y la

principal fuente de abastecimiento de agua potable de la zona conurbada de Guadalajara.

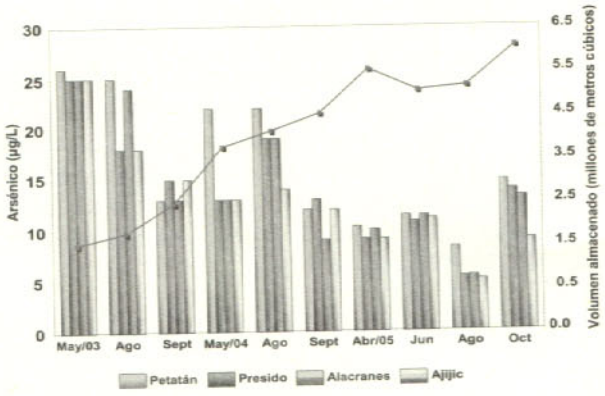


Figura 1. Concentración de arsénico en la columna de agua y los volúmenes de agua almacenados de mayo de 2003 a octubre de 2005 en el Lago de Chapala. (Cortés *et al.*, 2005)

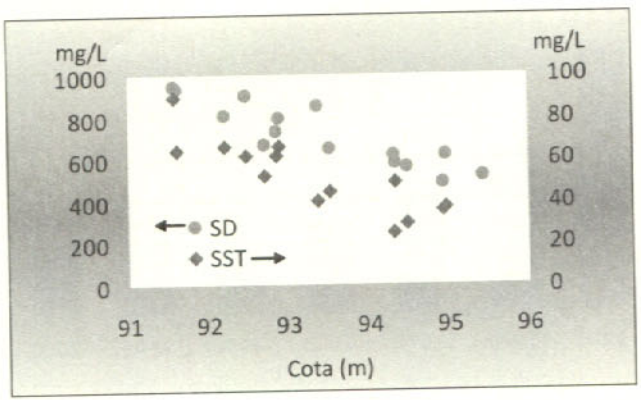


Figura 2. Variación de la calidad del agua con la Cota en el Lago de Chapala, Jalisco México (1990-2006). Elaboración propia con datos de (SEMARNAT, 2007; CONAGUA,2007)

El aumento de la temperatura influye además de manera directa en los procesos químicos y microbiológicos del agua, favoreciendo las velocidades de crecimiento del fitoplancton y de las macrofitas sumergidas (Ter Heerdt *et al.*, 2007). También afecta la concentración de oxígeno, el potencial redox, la estratificación de los cuerpos de agua y las velocidades de mezcla, pues todos dependen de la temperatura. Su influencia abarca también el medio ambiente, ya que si la temperatura del agua se incrementa, lo hace de igual manera

la transferencia de compuestos volátiles y semi-volátiles (amoníaco, mercurio, dioxinas, plaguicidas) de las masas de agua superficial a la atmósfera (Kundzewicz *et al.*, 2007).

Otra característica importante de las sequías del verano, es que probablemente el aumento en la temperatura del agua puede incrementar la actividad microbiológica en las redes de distribución y favorecer la reproducción de *Legionella* en ductos de edificios residenciales (Ramaker *et al.*, 2005). En México la mayor parte de la población almacena el agua en tanques domésticos, y aún cuando el agua esté adecuadamente clorada en la red de distribución, es imposible mantener el cloro residual en el agua del tanque si su temperatura es demasiado alta, lo que contribuye a la reactivación y proliferación de las bacterias. No obstante, no existen datos estadísticos de la calidad del agua en los domicilios, y su impacto en la salud, ni el riesgo que implica el almacenaje de agua y la falta de limpieza de los recipientes (Martín *et al.*, 2007).

Por otro lado, los eventos extremos como lluvias torrenciales aumentan el transporte de sedimento por los ríos. Estos sedimentos se contaminan a menudo con metales pesados y compuestos orgánicos (plaguicidas, fertilizantes, la descarga de industrias químicas, entre otros) y transportan esta contaminación hasta las fuentes de abastecimiento de agua potable (Meuleman *et al.*, 2007).

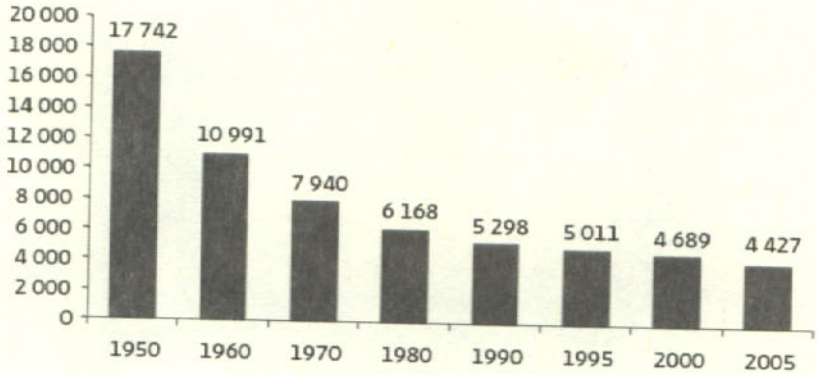


Figura 3 Variación de la disponibilidad natural media per cápita del agua en México, de 1950 a 2005 (m^3/hab/año). Fuente: (CONAGUA, 2008a)

En el escenario más extremo pronosticado (aumento de la temperatura de 4°C), el nivel de los ríos aumentaría en invierno un 30-40% y disminuirían un 25-30% en verano (Ramaker *et al.*, 2005). Este cambio posible de los patrones de lluvia, hará más difícil llenar durante el verano los reservorios de agua que sirven de abastecimiento, reduciendo la disponibilidad total de agua superficial, y aumentando los conflictos sociales entre usuarios agrícolas, municipales y ambientales del agua (Standish-Lee

y Lecina, 2008). En México por ejemplo, la disponibilidad natural media *per capita* del agua, ha venido disminuyendo paulatinamente como lo muestra la Figura 3

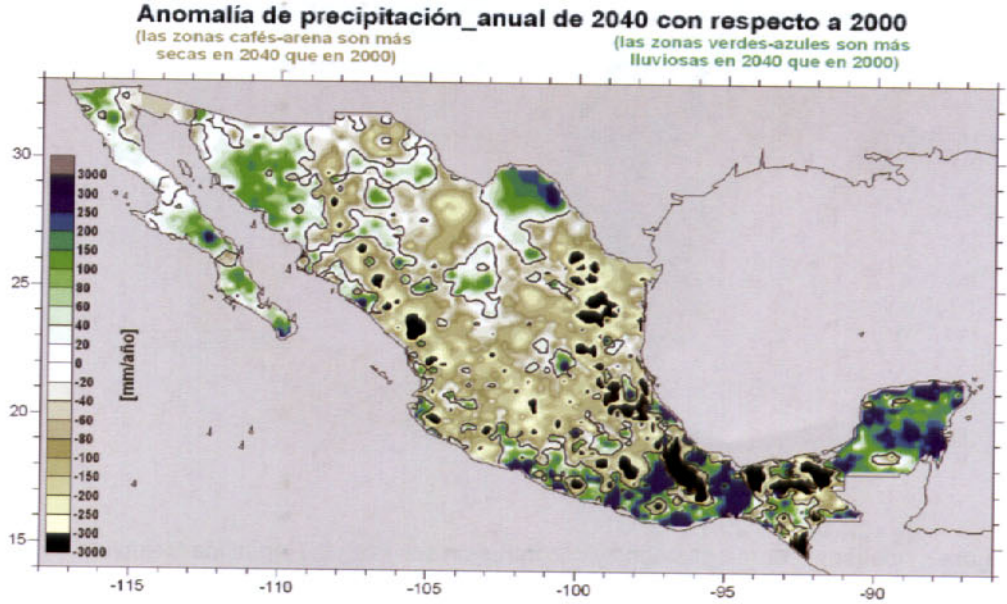


Figura 4 Anomalías de precipitación pluvial al año 2040 (Arreguín *et al.*, 2007)

La Comisión Nacional del Agua (Arreguín *et al.*, 2007), a través del Servicio Meteorológico Nacional, ha procesado información del año 1961 al 2000 sobre variables climáticas en México. Con esta información han validado y calibrado modelos de escala local, que permiten predecir notables incrementos de la precipitación anual (hasta de 300 mm/año) en las regiones noroeste y sureste de nuestro país, así como en algunas porciones de la región norte, y decrementos de la precipitación (hasta de 300 mm/año) en el resto del territorio (Figura 4).

El cambio del clima también puede tener un impacto importante en la incidencia de enfermedades gastrointestinales y en la aparición de ciertas enfermedades infecciosas de origen hídrico. *Giardia y Cryptosporidium*, dos parásitos de origen animal y humano presentes en las heces, pueden ser arrastrados a las fuentes de abastecimiento por el aumento en la intensidad de las tormentas (Martín *et al.*, 2007). Lamentablemente, con excepción de *Vibrio cholerae* y *Salmonella*, los estudios sobre la relación entre cambio climático y el contenido de microorganismos en agua, no se enfocan en agentes patógenos de interés en países en desarrollo, tales como protozoarios específicos o parásitos.

Figura 5 Acuíferos sobreexplotados y con intrusión salina en la República Mexicana. Fuente: (SEMARNAT, 2008)

En cuanto a las fuentes de abastecimiento subterráneas, la combinación de la disminución del nivel del acuífero y del aumento del nivel del mar, provoca la intrusión del agua salada (Ramaker *et al.*, 2005) y la posible contaminación por productos químicos o por patógenos (Martín *et al.*, 2007). En acuíferos interiores, una disminución en la recarga de aguas subterráneas puede conducir a la intrusión del agua salada de acuíferos salobres vecinos, además, un aumento de la evapotranspiración en las regiones áridas y semiáridas puede conducir a la salinización de acuíferos salobres vecinos, además, un aumento de la evapotranspiración en las regiones áridas y semiáridas puede conducir a la salinización de acuíferos poco profundos (Kundzewicz *et al.*, 2007).

De los 653 acuíferos existentes en la República Mexicana, 17 presentan ya problemas por intrusión salina (Figura 5). Un acuífero especialmente vulnerable a este problema es el de la península de Yucatán, ya que sus acuíferos kársticos propician la rápida propagación hacia tierra adentro de los efectos derivados del ascenso del nivel del mar (Arreguín *et al.*, 2007).

En general los sistemas de agua subterránea responden más lentamente al cambio del clima que los sistemas del agua superficial. Los niveles de agua subterránea se correlacionan más fuertemente con la precipitación que con temperatura, pero esta última llega a ser un factor importante para los acuíferos poco profundos en períodos de mucho calor (Kundzewicz *et al.*, 2007), debido a que afecta la concentración de oxígeno del agua que se infiltra y el con-

sumo del mismo dentro del acuífero. Durante el verano la degradación aeróbica del carbón orgánico aumenta con la temperatura y puede llegar a un consumo máximo del oxígeno de 11 mg/L. Si las altas temperaturas permanecen, la actividad microbiana disminuye por la disminución del oxígeno y esto puede originar condiciones anaerobias dentro del acuífero que van a afectar su calidad (Eckert *et al.,* 2008).

Por otro lado, las inundaciones provocan tiempos más cortos de estadía del agua en los ríos y por lo tanto una purificación natural del agua menos eficaz antes de infiltrarse en los acuíferos. Dependiendo de la localización de los pozos de extracción con respecto a los ríos, puede ser posible la presencia de patógenos y materia orgánica en el agua extraída (Eckert *et al.,* 2008). Esto es de particular importancia si se considera la recarga natural y artificial de acuíferos en zonas en las que hay gran influencia de descargas de aguas residuales, como es el caso de los Distritos de Riego en algunas entidades del país, como es el caso de Hidalgo, Chihuahua, Puebla y Estado de México, que aprovechan las aguas residuales para irrigar campos de cultivo sin ningún tipo de tratamiento (en México sólo se trata el 38.8% del agua recolectada en los sistemas de alcantarillado) (CONAGUA, 2008a), lo que origina que un alto contenido de patógenos de origen humano y animal, desechos industriales y agrícolas puedan llegar a los acuíferos o a las fuentes de abastecimiento de agua.

A esto hay que añadir que las descargas domésticas representan una de las principales fuentes de contaminantes llamados emergentes, los cuales se hacen cada vez más evidentes en los cuerpos de agua debido al uso indiscriminado de detergentes, blanqueadores, bloqueadores solares, suavizantes, fragancias, champús y demás artículos para el cuidado personal, así como de fármacos, hormonas, drogas permitidas y no permitidas, plastificantes, propelentes y retardantes para fuego. Estos compuestos no son eliminados por los sistemas convencionales de tratamiento y muchos de ellos son disruptores endocrinos que han demostrado tener efectos genéticos y alteraciones hormonales en organismos de diferentes niveles evolutivos, incluidos los humanos (Aboites *et al.,* 2008; López y Barceló, 2008; Barceló, 2003; Falconer *et al.,* 2006).

Estos contaminantes se caracterizan por ser poco evidentes debido a: falta de métodos analíticos suficientemente sensibles para su identificación, falta de métodos toxicológicos para identificar su actividad biológica y potencial efecto sobre los seres vivos, falta de datos ambientales, e incorporación de nuevos químicos (entre 200 y 1000 nuevas especies por año). Los contaminantes emergentes podrían estar incluidos en cualquiera de los siguientes grupos: Químicos Disruptores Endocrinos (EDC por sus siglas en inglés), Contaminantes Orgánicos Persistentes (POP), Fármacos y productos para el cuidado personal (PPCPs, por sus siglas en inglés), Contaminantes prioritarios y otros contaminantes regulados, Xenobióticos y Toxinas (Daughton, 2004).

No menos importantes son los subproductos de la desinfección del agua (DBP's por sus siglas en inglés), algunos de los cuales se encuentran regulados en la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), y a los que se pone en segundo término cuando se trata

de evitar enfermedades gastrointestinales mediante la desinfección.

Es importante señalar que los subproductos de la cloración están asociados con 5,000 casos de cáncer de vejiga y más de 8,000 casos de cáncer de recto en Estados Unidos, así como abortos espontáneos, bajo peso de los infantes al nacer y malformaciones congénitas (Aboites *et al.*, 2008). De hecho, dada la exposición prolongada y generalizada a los DBP's y las pruebas epidemiológicas, las investigaciones futuras podrían establecer a estos contaminantes como los carcinógenos ambientales más importantes en términos del número de cánceres atribuibles al año (Wigle, 2000). Otros contaminantes que toman cada vez más relevancia por encontrarse en acuíferos de zonas que no cuentan con más opciones de abastecimiento, son el arsénico, flúor, hierro, manganeso y los sólidos disueltos.

En resumen, el cada vez más escaso y contaminado recurso hídrico está obligando a los países a buscar formas eficientes y seguras de reciclaje y reutilización del agua, así como sistemas más baratos para aprovechar el agua salobre, de mar, o acuíferos con problemas de contaminantes traza (Parsons *et al.*, 2009).

Objetivo

El objetivo de este capítulo es hacer una descripción de la problemática a la que se enfrenta el tratamiento de agua para el abastecimiento público, y describir las diferentes opciones existentes para tratar los contaminantes que se espera que el cambio climático acentúe en nuestros cuerpos de agua.

Metodología

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica de los contaminantes que se supone más efecto tendrán en la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento como consecuencia del cambio climático, y se identificaron las tecnologías que la literatura establece como factibles para ser usadas en la remoción de esos contaminantes. Se describe de manera general cada una de las tecnologías, su posible aplicación, así como sus ventajas y desventajas, mencionando los resultados obtenidos en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua con algunas de ellas en aplicaciones específicas. Se dan datos referentes a los costos de operación e inversión de algunos de los procesos mencionados, sin embargo, es importante señalar que hay muy poca información en el país sobre análisis técnico económicos de estas tecnologías, por lo que se recomienda que cualquier proceso que se quiera utilizar, pase primero por una etapa de prueba a nivel planta piloto para obtener costos de operación y mantenimiento, así como eficiencias en condiciones reales de operación.

Resultados

De acuerdo a lo mencionado en la introducción, el efecto del cambio climático en la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento se verá reflejado principalmente en una mayor

presencia de contaminantes específicos, algunos de ellos incluso que no se consideran hoy en día importantes al momento de escoger la tecnología de potabilización adecuada. En México la tecnología de potabilización más utilizada por los sistemas de agua es la clarificación convencional, seguida de la clarificación de patente (Figura 6). Sin embargo, el uso de la Ósmosis Inversa ha venido incrementándose en los últimos años debido precisamente a la necesidad de desmineralizar agua o eliminar contaminantes disueltos que no pueden ser coagulados y precipitados.

Si en México se lleva a cabo la priorización de los contaminantes químicos que deben regularse, y se aplica la normatividad en caso de los ya regulados, los procesos de potabilización que deberán utilizarse estarán basados en tecnologías de punta que suelen ser más costosos que los que se utilizan actualmente. El tratamiento moderno del agua potable ha de cumplir muchos requisitos, incluida la eliminación eficaz de agentes patógenos, materia orgánica natural (NOM, por sus siglas en inglés), hierro, manganeso, amoníaco y diversos micro contaminantes orgánicos (Techneau, 2006)

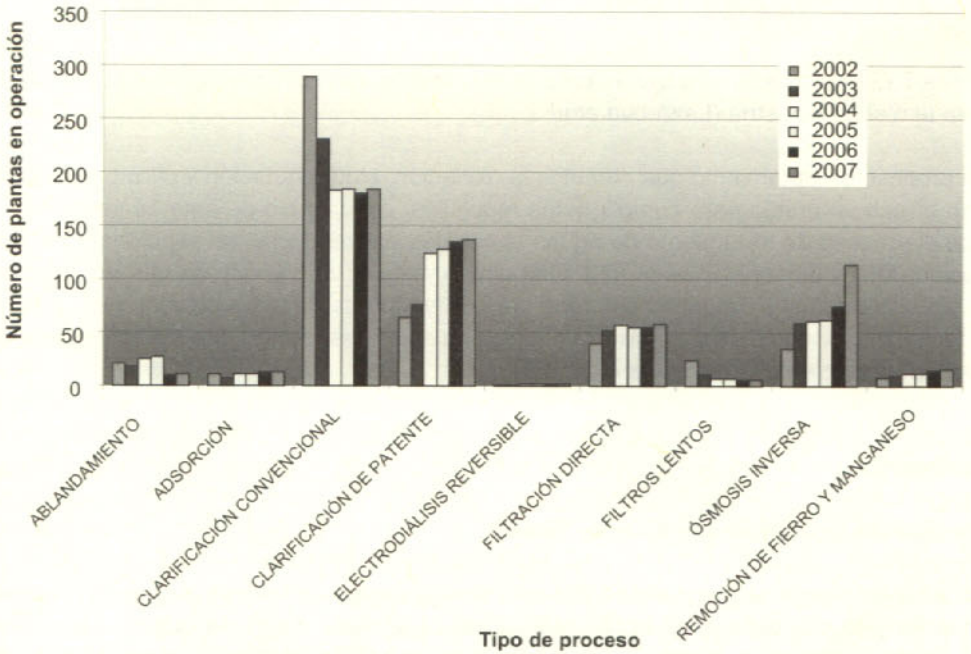


Figura 6 Plantas potabilizadoras en operación (1996-2007). (CONAGUA, 2008b)

Con un escenario cada vez más complejo que implica menos agua y mayor vulnerabilidad a la contaminación, el concepto de barreras múltiples es el esquema que se abre camino para la recuperación y aprovechamiento de los cada vez más escasos recursos hídricos (Figura 7).

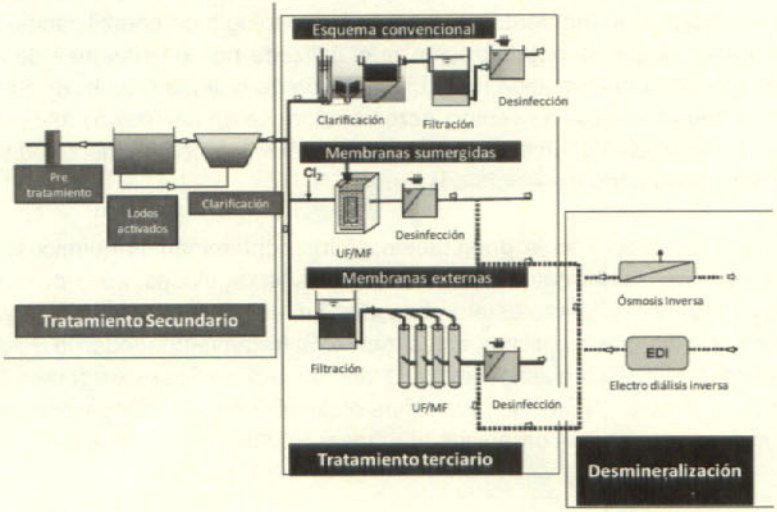


Figura 7 Ejemplo de tren de tratamiento para la reutilización del agua con fines potables o para uso en la industria (Lazarova *et al;* 2006)

Un proceso de tratamiento que combina la oxidación, biodegradación y ultra o microfiltración ofrece un medio para cumplir estos requisitos. Un ejemplo de esto es un tren en el cual el proceso de tratamiento de aguas residuales convencional, es seguido de microfiltración (MF) y ósmosis inversa (OI). Hay otros ejemplos en los que se utilizan efluentes de aguas residuales tratadas como una importante fuente de agua potable, pero a hasta la fecha sólo a través de sistemas de recarga de acuíferos, por las implicaciones sociales que esto representa (Parsons *et al.*, 2009).

Opciones de tratamiento

Clarificación convencional y filtración directa

Un tren convencional de potabilización está constituido generalmente por varios procesos en serie: una etapa de coagulación, en la cual se agregan reactivos químicos que favorecen la aglomeración de partículas mediante la formación de flocs más pesados que el agua, los cuales sedimentan en unidades de clarificación arrastrando y/o adsorbiendo los contaminantes del agua. En la siguiente etapa el agua sedimentada pasa a través de un medio filtrante que permite retener los flocs que no han sido eliminados en la etapa de sedimentación. La última etapa la constituye la aplicación de un desinfectante para eliminar cualquier riesgo por contaminación bacteriológica.

La creciente contaminación del agua puede interferir con los sistemas de potabilización convencionales (Zwolsman y van Bokhoven, 2007) y aumentar los costos de tratamiento y monitoreo requeridos para asegurar la calidad para el uso y consumo humano (Meuleman *et al.*, 2007). Frente a un aumento en la concentración de partículas suspendidas, algas o cambios temporales en la concentración del hierro y el aluminio en el agua cruda, se requieren más productos químicos y más agua de retrolavado en los filtros, además de que se produce mayor cantidad de lodo y las carreras de filtración se acortan (Slavik y Uhl, 2009). La cada vez mayor presencia de la materia orgánica (NOM) en las aguas superficiales requiere un mayor grado de eficiencia de las plantas potabilizadoras, por ejemplo, el aumento en la concentración de las sustancias húmicas dificulta la coagulación de los contaminantes del agua.

Con respecto al probable aumento de florecimientos algales por el incremento de la temperatura, se puede mencionar que las técnicas convencionales de potabilización, eliminan las células pero pueden no ser eficaces para destruir las toxinas disueltas (Westrick, 2005b). Algunos autores mencionan que un agua tratada adecuadamente, rara vez contiene niveles de toxinas que afecten la salud aún cuando las algas estén presentes en la fuente de abastecimiento (Water UK, 2006). En el caso de la aplicación de los sistemas convencionales de tratamiento para la eliminación de contaminantes emergentes, únicamente cuando estos se encuentren asociados a las partículas o a la materia orgánica coloidal serán eliminados durante la sedimentación y filtración (Snyder *et al.*, 2003).

Recientemente ha habido evolución en la coagulación, incluyendo una amplia gama de productos coagulantes como compuestos poliméricos tanto inorgánicos y orgánicos, así como un mejor conocimiento del funcionamiento del proceso; utilizando un coagulante metálico se producen residuos en forma de lodos y, una gran parte de la investigación reciente se ha enfocado a los procesos que pueden ofrecer el mismo rendimiento que un coagulante convencional, pero produciendo poco o ningún residuo sólido, además, es necesario producir coagulantes de alto rendimiento al pH natural del agua y poderlos recuperar para ser reutilizados (Parsons et al., 2009). Por ejemplo, el proceso de Actiflo® utiliza arena fina como lastre para mejorar la tasa de asentamiento de los flocs y aumentar la cinética de crecimiento durante la floculación. Las velocidades de sedimentación en este sistema son de una orden de magnitud mayor que en los sistemas tradicionales. Este proceso permite una reducción del 60-80 % del área requerida en un sedimentador tradicional (Parsons *et al.*, 2009). En el caso de brotes de *Cryptosporidium* debido al arrastre de materia contaminada, como consecuencia del aumento de lluvias intensas, es aconsejable adoptar un paso de filtración adicional en las plantas de agua potable, aunque esto representa un incremento del 20 al 30 % en los costos del tratamiento (Kundzewicz *et al.*, 2007).

De hecho, las dos principales áreas de aplicación para procesos de filtración en arena son la reducción de turbidez y la protección contra quistes, ooquiste, bacterias patógenas y virus, lo cual reviste gran importancia en el control de brotes epidémicos por hidrotransmi-

sión de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*. En la práctica, un filtro de arena bien operado producirá una turbiedad final de 0.1 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbiedad), eliminando con éxito este tipo de microorganismos.
La eliminación de otros constituyentes está relacionada más con la optimización del pre tratamiento que con el proceso de filtración, el cual no quitará contaminantes disueltos orgánicos o inorgánicos, a menos que hayan sido precipitados antes de entrar al filtro (Parsons *et al.*, 2009). Otros autores sugieren utilizar procesos de filtración que incluyan una etapa biológica, o procesos de tratamiento de agua potable más avanzados como los filtros granulares de carbón activado (GAC), carbón activado en polvo (PAC), ozono, intercambio iónico (II) o radiación ultravioleta (UV) (AWWA, 2008; Westrick, 2005a).

La evolución reciente en la utilización de filtros, ha incluido el desarrollo de nuevos medios para mejorar la captura de partículas o para reducir la energía que requieren para retrolavado, así como mejores procedimientos de retrolavado. Esto es importante si se considera que el volumen de agua de retrolavado en filtros rápidos a menudo oscila entre 2 y 7 % del agua potable producida, y contiene la carga de partículas del agua cruda incluyendo el floculante (Mueller y Witte, 2007). Otros estudios desarrollan procesos combinados de flotación y filtración con una probable optimización futura del tamaño de burbuja y taza de filtración (Parsons *et al.*, 2009). Los procesos de filtración convencional también se enfrentan a su principal rival, los procesos de membranas, los cuales tienden a ser la solución para la eliminación de contaminantes cada vez más presentes y difíciles de remover.

Membranas

El principio de operación de los procesos de filtración por membrana se basa en la separación de los contaminantes del agua a través de una membrana porosa y semipermeable. La membrana es una barrera de naturaleza orgánica o mineral que bajo el efecto de una fuerza directriz, detiene o deja pasar los solutos entre los dos medios que ella separa (Figura 8).

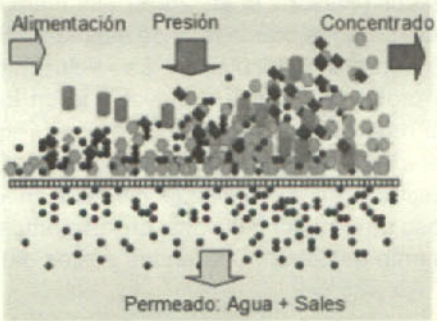


Figura 8 Principio de separación por membranas de filtración.

En el campo de aplicación del tratamiento del agua, la fuerza directriz aplicada usualmente es un gradiente de presión (ΔP) y las membranas utilizadas son poliméricas. El arreglo del sistema es de flujo cruzado o tangencial (*crossflow filtration*) y la turbulencia de la misma alimentación coadyuva a minimizar la deposición de los solutos en la superficie de la membrana.

Los procesos de membrana con la mayor aplicación al tratamiento de agua potable son Ósmosis inversa (OI), Nanofiltration (NF), Ultrafiltración (UF) y Microfiltración (MF). La selección del tipo de membrana se centra en el tamaño mínimo del componente a rechazar por la membrana (Parsons *et al.*, 2009) (Figura 9). La OI aparece como la mejor tecnología disponible para la desalinización de aguas y eliminación de contaminantes traza (Lazarova *et al.*, 2006).

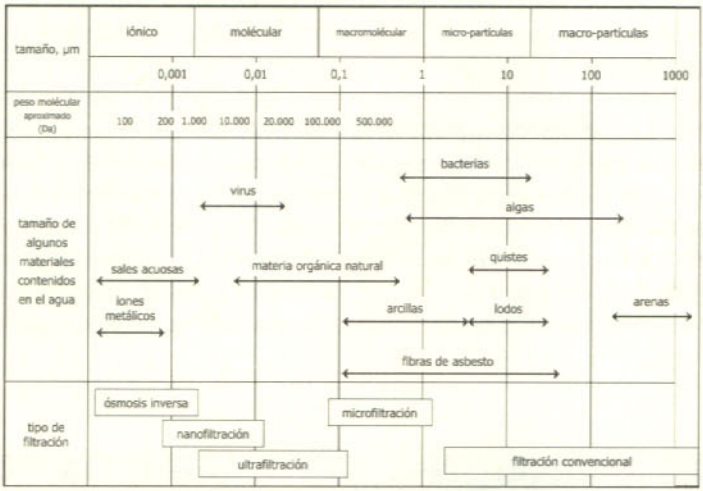


Figura 9 Dominio de separación entre las operaciones de filtración

Las bacterias, los parásitos y los virus se remueven fácilmente con NF, UF y MF, a excepción de aquellos virus que pasan a través de las membranas de MF más porosas (0.2 µm límite) (Lazarova *et al.*, 2006). Analizando la información presentada en la literatura (Agenson *et al.*, 2003; Ngheim y Hawkes, 2007; Yoon *et al.*, 2007; Radjenovic *et al.*, 2008), se puede observar que la mayor parte de los contaminantes emergentes (disruptores endocrinos, plaguicidas, fármacos activos, entre otros) tienen un peso molecular dentro del intervalo de los 200 a 400 Da, por lo que las membranas de NF son potencialmente útiles para eliminarlos. El uso de la desalinización por OI en el mundo está creciendo a una tasa de 10 a 15 % al año. También el tamaño de las plantas sigue creciendo, ya que la industria gana confianza y los factores tecno-económicos favorecen la tecnología de membrana sobre otros métodos alternativos; sin embargo, los retos de esta tecnología son tanto técnicos como sociopolíticos y estos desafíos están vinculados. En el contexto de los desafíos técnicos, hay al menos cuatro temas principales: calidad del permeado y del producto, ensuciamiento y su control, uso de energía y sostenibilidad (Fane, 2007).

Un gran reto para la tecnología de membrana y la industria del agua es la necesidad de responder al cambio climático. Esto se traduce a estudiar el uso de energía y las emisiones de carbono, las cuales tienen que disminuir significativamente en los próximos años. Esto necesariamente afecta a esta tecnología, la cual hace uso intensivo de energía primaria (Fane, 2007). Las membranas de OI son muy sensibles al ensuciamiento y, algunas veces el análisis de la calidad del agua no es capaz de proporcionar una buena explicación del ensuciamiento ni de la eficiencia del sistema en condiciones reales de operación. Esto pone en evidencia la necesidad de tener en el país laboratorios con infraestructura que permita llevar a cabo pruebas de tratabilidad *in situ* y un análisis más detallado mediante autopsias de membranas (Lazarova *et al.*, 2006). Un laboratorio de este tipo, con equipos a escala piloto, se encuentra ubicado en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Figura 10).

El agua cruda contiene materia orgánica natural (NOM), que es un incrustante complejo de las membranas. La investigación hoy en día se enfoca a alcanzar el máximo rendimiento de flujo y encontrar la membrana anti incrustante. Sin embargo, el tratamiento previo sigue siendo un aspecto esencial y desafiante en el uso de membranas para el tratamiento de agua (Fane, 2007; Lazarova *et al.*, 2006). Algunos de los desarrollos clave han sido la introducción de la membrana de película delgada de alta presión para OI y NF, y la proliferación de las membranas de fibra hueca muy eficaz para baja presión en UF y MF. (Fane, 2007).

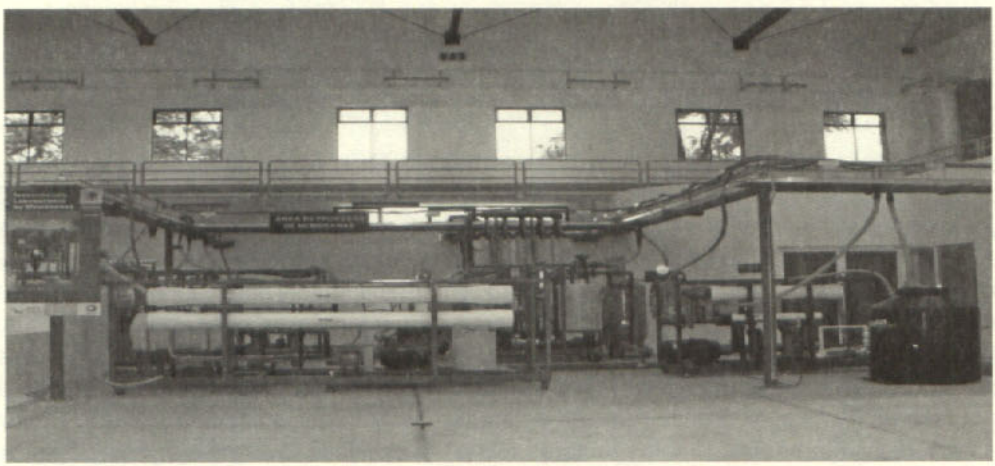


Figura 10 Laboratorio para pruebas de tratabilidad, autopsias y evaluaciones destructivas y no destructivas de membranas utilizadas en el tratamiento del agua

Las membranas de película delgada son producidas por polimerización interfacial, sin embargo, recientemente ha habido importantes avances que involucran una película fina de nanocompuestos. Estas membranas de matriz mixta incorporan nanopartículas tales como zeolitas en la delgada película de separación de poliamida. Las zeolitas imparten una mayor hidroficidad y carga, y mejoran la permeabilidad de agua sin pérdida de propiedades de retención (Fane, 2007).

Una nueva generación de membranas de OI podría provenir del enfoque de nanotubos de carbono que promete el aumento de varias órdenes de magnitud en la permeabilidad. Las membranas de destilación (MD) también son una alternativa si se consigue producir calor a bajo precio y sin implicaciones en términos de gases de efecto invernadero. Este tipo de membranas tiene la ventaja que los flujos pueden ser mantenidos a muy altas concentraciones de sal (Fane, 2007). Membranas inorgánicas, tales como las cerámicas, tienen varias propiedades útiles como su resistencia mecánica, química y térmica, alta porosidad y una superficie hidrofílica (Mueller y Witte, 2007).

Sistemas Biológicos de tratamiento de OI producen agua potable de alta calidad a un menor costo que el tratamiento convencional de OI. Este proceso utiliza como soporte de los microorganismos arcilla expandida, resultando en la oxidación completa del nitrógeno amoniacal. Una segunda etapa consiste en pasar el agua en continuo a través de una cama de calcio y magnesio para remineralizarla y producir agua apta para consumo humano (Peterson *et al.*, 2007). Aunque las tecnologías de membranas producen agua de alta calidad, del 15 al 20 % de la entrada es descargada como aguas residuales o concentrados. La presencia de micro contaminantes en el concentrado, tales como plaguicidas y disruptores endocrinos, puede incrementarse en un factor de 5 a 7, dificultando la evacuación de los desechos (Techneau, 2006).

La Organización Veolia Water Anjou Recherche está conduciendo investigaciones para evaluar el rendimiento de las tecnologías convencionales y de oxidación avanzada, tales como oxidación/adsorción, adsorción/separación con membranas, ultravioleta/peróxido de hidrógeno (UV/H_2O_2), para eliminar micro contaminantes de los concentrados de los procesos a membrana (Techneau, 2006). Otro proceso de membrana menos utilizado es la electrodiálisis, en el cual se lleva a cabo la separación de iones a través de una serie de membranas situadas sucesivamente con separaciones de milímetros entre sí. La aplicación de campos eléctricos genera la migración de los iones que pasan por estas membranas que actúan como tamices. La electrodiálisis sólo es competitiva con la OI en casos especiales, debido a los costos de la membrana, su menor eficiencia (Fane, 2007), y porque aún es problemática para efluentes con alta conductividad (4 ó 5 dS/m) (Lzarova *et al.*, 2006).

Oxidación avanzada

Si la eficiencia del sistema en remover materia orgánica disminuye, el potencial de formación de subproductos de la desinfección (DBP's, por sus siglas en inglés) y de contamina-

ción microbiana aumentan (Slavik y Uhl, 2009). Debido a esto, los tradicionales productos oxidantes - desinfectantes, cloro gas e hipocloritos de sodio y calcio, tienden a ser reemplazados por otros oxidantes que permiten eliminar problemas de sabor y olor, así como evitar producir tóxicos organoclorados como resultado de la desinfección (Westrick, 2005b; Parsons *et al.*, 2009).

La desinfección puede lograrse por agentes químicos como cloro, yodo y ozono, o agentes físicos incluyendo calor, luz o separación física por microfiltración. Aún cuando el cloro es el desinfectante más utilizado en tratamiento de agua, al igual que el ozono ambos tienen el potencial de formar subproductos de desinfección. Debido a esto, el uso de cloraminas se está volviendo cada vez más popular (Parsons *et al.*, 2009).

Tradicionalmente, en potabilización los oxidantes más empleados son el hipoclorito (HClO), el dióxido de cloro (ClO_2), el ozono (O_3), la radiación ultravioleta (UV) y las cloraminas. Los tres primeros oxidantes son fuertemente electrófilos y presentan reactividad especifica con algunos compuestos orgánicos; el orden de reactividad para estos tres oxidantes es O_3 > ClO_2 > HClO. En países europeos el O_3 es comúnmente utilizado en el tratamiento de aguas superficiales, en tanto que en EEUU se prefiere el uso del cloro libre.

La cloraminación (es decir, dosificar una cantidad controlada de amoníaco en forma de sulfato de amonio después del cloro) como método de desinfección, tiene la ventaja de proporcionar un residual a más largo plazo en el sistema de distribución y superar los problemas de sabor asociado con el exceso de cloro libre, pero también puede producir subproductos indeseables y generar sabor en el agua si no se aplica correctamente. De hecho, cambiar de cloro a monocloraminas ha demostrado que aumenta la concentración de ciertos subproductos de desinfección nitrogenada (N-DBP's) que son considerablemente más citotóxicos y genotóxicos que los trihalometanos (Parsons *et al.*, 2009).

El dióxido de cloro (ClO_2) es un desinfectante cuya capacidad biocida sobrepasa a la de otros productos clorados. Es más efectivo para la inactivación de virus, *Cryptosporidium y Giardia* (EPA, 1999). Debido a sus cualidades oxidantes selectivas, su aplicación es una alternativa a ser considerada en donde además de la desinfección se requiere mejorar la calidad organoléptica del agua. Tiene un gran efecto en el control del sabor y el olor, así como para destruir sustancias orgánicas que proporcionan color o que son precursoras de trihalometanos (THM). Por ello, se aplica especialmente cuando las aguas crudas contienen altas concentraciones de precursores, que con la cloración tradicional darían lugar a la formación de DBP's. A pesar de ello, su uso como desinfectante en plantas de tratamiento se ve limitado a causa de su complejidad y sensibilidad en la producción y a su relativo alto costo (Solsona y Méndez, 2002).

El Ozono (O_3) se utiliza ampliamente en tratamiento de agua como desinfectante y oxidante en virtud de que en el agua genera radicales oxhidrilo libres. La transformación de compuestos orgánicos con O_3 ocurre, ya sea a través de la reacción directa con O_3 o con

los radicales oxhidrilo (•OH) que resultan de la transformación este gas en el agua. El O_3 reacciona selectivamente con algunos compuestos orgánicos, mientras que el radical •OH reacciona con la mayoría de estos. Se puede incrementar la formación de •OH con adición de H_2O_2, a lo que se le conoce como oxidación avanzada (AOP, por sus siglas en inglés), para reducir el tiempo de reacción necesario para la transformación de los micro contaminantes presentes en el agua (Katsoyiannis y von Gunten, 2009)

El ozono rompe las moléculas orgánicas grandes en más pequeñas por lo que se ha implementado su uso también con carbón activado (GAC o PAC) para que este último absorba estas moléculas pequeñas. La disminución de tamaño de las moléculas orgánicas favorece también su remoción en procesos biológicos que utilizan PAC como soporte para el crecimiento de bacterias. El suministro de O_3 aguas arriba de los filtros, extiende la vida del carbón activado, sin embargo, debido a que ambos procesos tienen un costo de capital y de operación alto, se debe hacer un análisis económico cuidadoso antes de implementarlos (Parsons *et al.*, 2009).

La oxidación con O_3 seguida de biofiltración, puede quitar hasta el 90% de muchos microcontaminantes orgánicos. Numerosas investigaciones han demostrado que la ozonación de agua conteniendo materia orgánica quita eficientemente el color y disminuye la adsorbancia en el UV, pero alcanza sólo una pequeña reducción en el carbono orgánico disuelto (COD) (Techneau, 2006), además forma como subproducto al bromato (BrO_3^-), un oxianión de bromo clasificado por la OMS como un 'posible carcinógeno humano', que se genera al ozonar agua conteniendo este contaminante (Parsons *et al.*, 2009). Sin embargo, los subproductos biodegradables de la ozonación se pueden quitar por filtración biológica posterior, dando una extracción de COD global del 10 al 50 %. En comparación con el cloro, el O_3 por sí solo produce los niveles más bajos de actividad mutagénica en agua tratada y el cloro los niveles más altos (Wigle, 2000).

Es importante considerar que la efectividad del O_3 en la reducción microbiana y producción de DBP's varía con las características fisicoquímicas del agua (por ejemplo pH, temperatura, partículas, concentración de bromuro) y la ozonación por sí sola no asegura la desinfección residual en los sistemas de distribución (Wigle, 2000) por lo que es necesario usar cloro u otro desinfectante químico para mantener un residual protector.

Los procesos de oxidación avanzada (AOP) son una tecnología que se aplica a la práctica de tratamiento de agua potable. Una de estas técnicas es el proceso de oxidación Fenton con combinación de peróxido de hidrógeno y hierro férrico para producir radicales OH^- que pueden oxidar compuestos orgánicos. El proceso Fenton puede ser una forma eficaz de tratamiento de agua para quitar micro-contaminantes sin formación de bromato, y con bajos costos. Las investigaciones hoy en día se enfocan a comprender el papel del COD y la alcalinidad, en la producción de radicales de hidróxido. El proceso Fenton puede trabajar incluso a pH ambiente, pero la matriz del agua y principalmente la alcalinidad, el tipo y la concentración de COD y la presencia de diferentes ligandos, desempeñan un papel promi-

nente en la formación y la destrucción de productos de oxidación intermedios, que a su vez determinan la eficiencia del método (Ogier *et al.*, 2008).

Otros métodos de oxidación como la combinación de UV con dióxido de titanio (UV/TiO_2) o con peróxido de oxígeno (UV/H_2O_2) mejoran la eliminación total de NOM y otros compuestos orgánicos (Techneau, 2006). UV en combinación con H_2O_2 parece tener más probabilidades de éxito que el O_3 (Parsons *et al.*, 2009). Aún cuando el uso de UV/H_2O_2 como una alternativa a O_3/H_2O_2 consume aproximadamente 10 veces más energía que la ozonación, evita la formación bromato y asegura la desinfección. Esto sería una solución viable para aguas con altas concentraciones de bromuro y micro contaminantes orgánicos no susceptibles a la oxidación directa de ozono (Katsoyiannis y von Gunten, 2009).

Algunas ventajas de la radiación ultravioleta son: es un proceso físico, no implica transporte, almacenamiento, tratamiento o uso de sustancias químicas peligrosas, el sabor y olor de agua potable no se ven afectados por su uso. Por otro lado, el tiempo de residencia necesario es del orden de segundos a diferencia de los minutos que se requieren con otros desinfectantes, lo que permite reactores más pequeños y, por lo tanto, reducir los costos (PHYSorg, 2006).

La materia orgánica y los iones inorgánicos presentes en agua natural, también reaccionan con los radicales oxhidrilo que se producen durante la oxidación con UV. No obstante la efectividad en la eliminación de microorganismos patógenos y contaminantes orgánicos con tecnología UV, esto también induce reacciones secundarias no deseadas en presencia de esa materia orgánica, lo que conlleva a la formación de subproductos como los nitritos a partir de nitratos, aunque no hay formación bromatos (Jpelaar *et al.*, 2007). La desinfección con UV también es eficiente para inactivar *Cryptosporidium*, el cual es resistente a los productos químicos utilizados tradicionalmente para desinfección del agua, como son los productos clorados (PHYSorg, 2006). La desinfección con UV o las cloraminas no inactivan exotoxinas de algas, y hay que tomar en cuenta que aunque diversos oxidantes pueden inactivar algunas de estas biotoxinas, no es posible inactivar todos los tipos de cianotoxinas conocidas con un solo oxidante (Westrick, 2005b).

Adsorción

El carbón activado es otro proceso eficaz para eliminar materia orgánica natural, color, pesticidas, sabor y olor. La ozonación seguida por carbón activado puede eliminar moléculas orgánicas grandes debido a que el ozono descompone estas moléculas en más pequeñas que son fácilmente absorbidos por el carbón activado (Parsons *et al.*, 2009).
El carbón activado se fabrica de una amplia variedad de materiales como el carbón de hulla (lignita), hueso, cáscara de madera y coco. El material básico de carbón se somete a un proceso de fabricación que crea una enorme área interna dentro de las partículas de carbón. Por ejemplo, un gramo de carbón de suelo tiene una superficie interna de sólo 10 m^2, durante el proceso de activación esta área superficial interna se incrementa hasta

1000 m^2. Por lo tanto, el proceso de activación transforma la partícula de carbono en un adsorbente muy útil que se utiliza en la industria del agua para quitar compuestos orgánicos e inorgánicos (Parsons *et al.*, 2009).

Hay estudios que combinan carbón activado con tres diferentes tipos de membranas de Ultra Filtración (UF), disponibles comercialmente, para quitar microcistina-lr de muestras de agua potable. Los resultados mostraron eficiencias de remoción entre el 95 y 99%. Sin embargo, sin el carbón activado, incluso la membrana más eficaz elimina sólo el 78% de la toxina (PHYSorg, 2006).

Electroquímicos

Una opción interesante que elimina la sal sin membranas es la Deionización Capacitiva (CDI) o 'aerogel de carbono', proceso desarrollado en los laboratorios de Lawrence Livermore. En este proceso, los iones de sal son removidos por los electrodos aerogel y luego liberados en el concentrado por inversión de polaridad. El CDI tiene todavía problemas de escalamiento y cuestiones prácticas que resolver en cuanto a la prevención del ensuciamiento y la vida útil del aerogel (Fane, 2007).

Otro sistema que se está retomando para el tratamiento de agua en los últimos años es el de la electrocoagulación. En este proceso, a diferencia de la clarificación química, el coagulante es generado *in situ* por la oxidación electrolítica de un electrodo de sacrificio. En la electrocoagulación se combinan los efectos de la producción, por electrólisis, de gases como el H_2 y el O_2 y la producción de cationes polivalentes por la oxidación de ánodos fabricados en hierro (Fe^{+2}) o en aluminio (Al^{+3}).

Esta generación de iones está acompañada por la concentración electroforética de partículas alrededor del electrodo, los cuales neutralizan su carga coagulando. Los adsorbentes liberados forman largas cadenas de polihidróxidos los cuales son diferentes a los formados por Fe^{+2} o Al^{+3} cuando se añaden en sales químicas, debido a que tienen diferente estructura hidratada. Esta situación permite retirar, retener y desecar con mayor facilidad los lodos residuales ya que los flocs formados de esta forma son menos hidratados, conteniendo menos agua ligada y por lo tanto se compactan más fácilmente. Las líneas de investigación actuales se centran en el aumento de la eficiencia y la disminución de los costos por consumo de energía, así como el escalamiento de este tipo de procesos a plantas reales. Trabajos realizados en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua han mostrado la eficiencia del sistema para eliminar arsénico de agua para consumo humano (Rivera Huerta *et al.*, 2008) permitiendo obtener agua con niveles de este contaminante por debajo de los 25 µg/l que establece la norma actual (Figura 11).

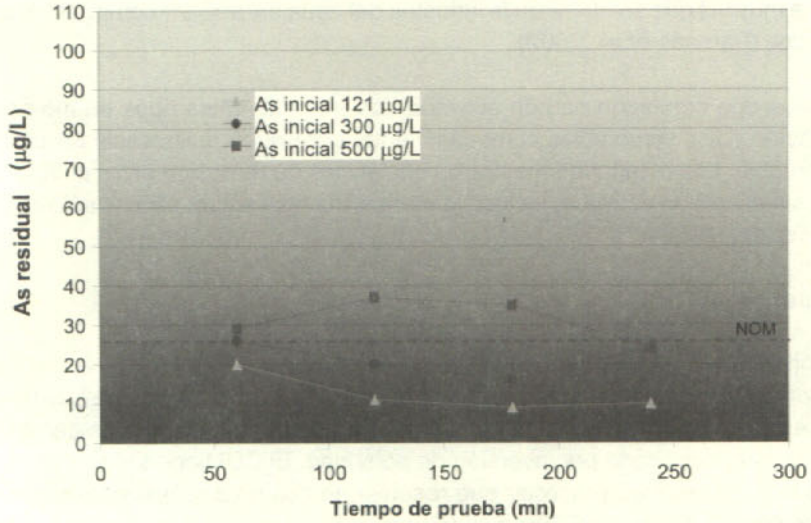


Figura 11 Remoción de arsénico mediante la aplicación de 10 mg/L de hierro producidos en un sistema de electrocoagulación

Costos

Hoy en día los procesos de membranas desempeñan un papel central en la desalinización de agua de mar y tratamiento de aguas crudas. En la actualidad se puede producir agua potable a partir de agua de mar con costos que van desde US $0.5 a $0.7 por m^3 según algunos autores (Fane, 2007). Otros reportan el costo de desalinización de agua de mar en alrededor de US $1/$m^3$ y el agua salobre en US $0.60/$m^3$ (Zhou y Tol, 2005).

El costo de la desalación ha venido bajando; sin embargo, hay problemas sin resolver por las consecuencias que para el medio ambiente tienen, tanto el arrastre de organismos marinos, la disposición segura de las salmueras altamente concentradas que pueden también contener otros productos químicos usados en el proceso de la desalación, como el alto consumo de energía. Esto último tiene impactos negativos en los costos y emisión de CO_2 lo que puede obstaculizar la extensión de la desalación (Kundzewicz *et al.*, 2007), sobre todo si se considera que la energía representa aproximadamente el 34% de los costos de producción de agua, y que si la calidad del agua en las fuentes disminuye, mayores serán estos costos (Parsons *et al.*, 2009). En la Figura 12 se comparan los costos de tratamiento para diferentes tipos de agua con tratamiento convencional y por membranas, es interesante notar que para plantas grandes los procesos de membranas son más caros que el convencional, pero para plantas pequeñas, en algunos casos ya es competitivo.

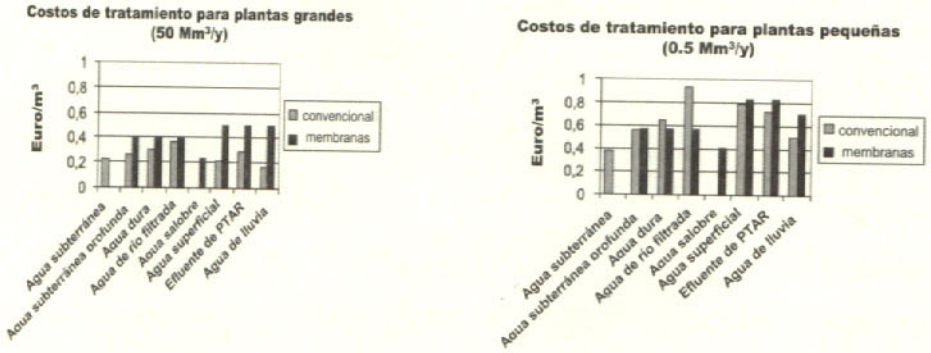


Figura 12. Comparación de costos entre los sistemas convencionales y de membranas, con diferentes tipos de agua para plantas grandes y pequeñas (Ramaker *et al.*,2005)

En cuanto al O_3, el equipo necesario para producirlo es caro y hay un consumo importante de energía y productos químicos. El costo reportado para una amortización de 20 años está alrededor de US \$0.038/m³ de agua tratada (Calfed Bay.Delta Program, 2007). La Tabla 1 muestra otros costos reportados para diferentes tipos de tratamiento y diferentes tipos de agua.

Conclusiones

Los sistemas de agua potable generalmente se construyen bajo la premisa de 'grande es barato'. Sin embargo, en un futuro próximo muchos sistemas centralizados se verán en la necesidad de hacer frente al desafío del deterioro de los sistemas de distribución, vulnerabilidad a desastres naturales, aumento de la contaminación del agua y las consecuencias del cambio de clima (Ramaker *et al.*, 2005). Tradicionalmente, las reglas de diseño hidrológico se han basado en el supuesto de la hidrología estacionaria, equivalente al principio de que el pasado es la clave para el futuro. Esta suposición ya no es válida, por lo tanto, los procedimientos actuales para diseñar las infraestructuras relacionadas con el agua tienen que ser revisados, de lo contrario, los sistemas estarán sobre o subdimensionados, resultando en gastos excesivos o bajo rendimiento (Kundzewicz *et al.*, 2007).

La adaptación de la producción del agua potable se basa en el aumento de la flexibilidad de las instalaciones. Los ejemplos son: producción de recursos alternativos tales como agua de mar, agua de lluvia, agua subterránea salobre y aguas residuales domésticas, usando técnicas innovadoras de tratamiento tales como la tecnología de membranas, la oxidación avanzada y/o los procesos electroquímicos (Standish-Lee y Lecina, 2008). Sin embargo, algunas opciones de adaptación en cuestión de calidad del agua, como la desalinización que utiliza grandes cantidades de energía, pueden llegar a ser incompatibles con la política de mitigación (Kundzewicz *et al.*, 2007).

Tabla 1 Costos de diferentes tipos de tratamiento para diferentes tipo de agua

UBICACIÓN	TRATA-MIENTO	CAPACIDAD m^3/d	TIPO	COSTO DEL AGUA USD/m^3	REF
Okinawa, Japón	F + OI	40,000	AM	1.40 (2008)	Yamashiro & Goto, 2008
Kwinana, Australia	OI	140,000	AM	0.53 (2006)	Wat-Tech, 2009
California, EEUU	OI		ASal	0.13 (2007)	Cooley, 2006
Ashkelon, Israel	OI	165,000	AM	0.53 (2007)	Greenlee et al., 2009
Florida, EEUU	A + NF	3,800	ASup	0.91 (1996)	Gorenflo et al., 2002
Florida, EEUU	A + NF	53,000	ASup	0.15 (1996)	Gorenflo et al., 2002
California, EEUU	OI	10,000	AM	1.22 (2007)	Cooley, 2006
El Cairo, Egipto	OI/ NF+OI+MD	100	AM	0.92 (2007)	El-Zanati & El-Khatib 2007
Noroeste de Méx	OI	8,640	AM	0.06 (2007)	Correa, 2007
Sonora, México	CI + F	52,000	ASub	0.06 (2005)	Ramírez et al., 2005
Sonora, México	C-FI+F+CI	70,000	ASub	0.11 (2005)	Ramírez et al., 2005
Sonora, México	OI	70,000	ASal	0.06 (2005)	Ramírez et al., 2005
SLP, México	F + OI	1080	AP	0.49 (2008)	IMTA, 2009
Dhekelia, Chipre	OI	5,000	AM	0.74 (1996)	Wat-Tech, 2009
Eilat, Israel	OI	10,000	AM/ASal	1.09 (1997)	Greenlee et al., 2009
Hamma, Algeria	OI	200,000	AM	0.84 (2003)	EDS (2004), Segal (2004)
Larnaca, Chipre	OI	54,000	AM	0.79 (2000)	Koutsakos y Moxey, 2008
Tuas, Singapore	OI	136,380	AM	0.49 (2007)	Wat-Tech, 2009
St Michael, Barbados	OI	30,000	ASal	1.78 (2008)	Wat-Tech, 2009
Florida, EEUU	OI	95,000	AM	0.55 (2003)	Cooley, 2006

F: Filtración; OI: Osmosis Inversa; NF: Nanofiltración; C-FI: Coagulación – Floculación; CI: Cloración; AM: agua de mar; ASub: agua subterránea; ASup: agua superficial; AP: agua de pozo; ASal: agua salobre.

▭ costos obtenidos mediante modelación de la planta.

La transición a los sistemas de abastecimiento de agua flexibles toma entre 20-30 años. En este momento los conceptos flexibles no pueden competir con la infraestructura existente porque los activos tienen períodos largos de depreciación de la inversión. Esto hace el cambio muy costoso y poco atractivo para los sistemas de agua, por lo tanto se debe aprovechar cada oportunidad para el cambio, es decir, cada decisión de inversión es una oportunidad de flexibilizar los conceptos actuales del abastecimiento de agua (Ramaker *et al.*, 2005).

Literatura citada

Aboites L., Cifuentes E., Jiménez B., Torregrosa M. L., 2008. Agenda del agua, Academia Mexicana de Ciencias, Red del Agua, ISBN 978-607-95166-0-4. México, 2008.

Agenson K., Oh J., Urase T., 2003. Retention of a wide variety of organic pollutants by different nanofiltration/reverse osmosis membranes: controlling parameters of process, Journal of Membrane Science, 2003 Vol. 225, pp 91–103.

Arreguín F., Chávez R. y Rosengaus M, 2007. Impacto del cambio climático sobre los acuíferos mexicanos, 6° Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Asociación Geohidrológica Mexicana, A. C., Zacatecas, Octubre 2007.

ATSDR, 2000. Toxicological profile for arsenic. U. S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. USA.

AWWA Research Foundation, 2008. Drinking Water Research, Climate Change and Drinking Water, Special Issue 2008, Volume 18, Number 2.

Barceló D., 2003. Emerging pollutants in water analysis, TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2003 vol. 22, iss. 10, November, pp xiv-xvi.

Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds., 2008: Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

Calfed Bay Delta Program, 2007. Delta Vision Blue Ribbon Task Force. Page 3 of 7, http://deltavision.ca.gov/BlueRibbonTaskForce/Nov2007/Handouts/Attachment_%204.pdf, November 19, 2007.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, 2008a.Estadísticas del agua en México 2008, ISBN 978-968-817-895-9, SEMARNAT, México.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, 2008b. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento 2008, ISBN: 978-968-817-860-7, SEMARNAT, México.

CONAGUA, 2007. información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacífico, Dirección Técnica, Centro de Estudios Limnológicos.

Cooley H., Gleick P. H. and Wolff G., 2006. Desalination, with a grain of salt, A California Perspective, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security, www.pacinst.org, June 2006.

Correa Díaz Felipe, 2007. Evaluación de la sustentabilidad en la instalación de plantas desaladoras, de agua de mar, en la región noroeste de México, Tesis Doctoral, Universidad de las Palmas en Gran Canaria, Julio, 2007.

Cortés Muñoz J. E., Calderón Mólgora C. G. y Montellanos Palacios L., 2005. Estudio Piloto para la evaluación de la exposición de habitantes de las comunidades aledañas al lago de Chapala a contaminantes en el agua (tercera etapa), Informe Técnico TC-0582, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Daughton C., 2004. Non-regulated water contaminants: emerging research, Environmental Impact Assessment Review, Volume 24, Issues 7-8, Pages 711-732, October-November 2004.

Eckert P., Lamberts R. and Wagner C., 2008. The impact of climate change on drinking water supply by riverbank filtration, Water Science & Technology: Water Supply—WSTWS, Vol. 8, No. 3, pp 319–324, IWA Publishing 2008.

EPA, 1999. Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual, United States Office of Water Environmental Protection Agency. EPA 815-R-99-014 (4607), April 1999.

Falconer I., Chapman H., Moore M., Ranmuthugala G., 2006. Endocrine-Disrupting Compounds: A Review of Their Challenge to Sustainable and Safe Water Supply and Water Reuse, Environmental Toxicology DOI 10.1002/tox.

Fane T., 2007. Membranes: Achievements, Challenges and the Future, 4th IWA Leading Edge Conference and Exhibition on Water and Wastewater Technologies, 3-6 June 2007.

Gorenflo A., Velazquez D. and Frimmel F. H., 2002. Nanofiltration of a German groundwater of high hardness and NOM content: performance and costs, Desalination, Vol. 15-1, pp 253-265, 2002.

Greenlee L., Lawler D., Freeman B., Marrot B. and Moulin Ph., 2009. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology and today's challenges, Water Research, Vol. 43, pp 2317 – 2348, 2009.

IARC. Internacional Agency for Research for Cancer. 2004. Arsenic in drinking water. In: *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 84.* pp 41-229. 2004.

Jpelaar G. F., Harmsen D. J. H. and Heringa M., 2007. UV disinfection and UV/H2O2 oxidation: by-product formation and control, Techneau, D2.4.1.1 (Kiwa WR), May 2007.

Katsoyiannis I. A. and von Gunten U, 2009. Comparison of Energy Requirements of Conventional Ozonation and the AOP, O3/H2O2 for Transformation of Target Micropollutants in Diverse Water Matrices, http://www.techneau.org/fileadmin/files/Publications/Publications/Deliverables/D2.4.2.3.pdf

Koutsakos E.and Moxey D., 2008. Larnaca desalination plant, Cyprus — from an efficient to an effective plant operation, Desalination, Vol. 221, pp 84–91, 2008.

Kundzewicz Z. W., Mata L. J., Arnell N. W., Döll P., Kabat P., Jiménez B., Miller K. A., Oki T., Sen Z. and Shiklomanov I. A., 2007. Freshwater resources and their management, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 173-210. 2007.

Lazarova V., Rougé Ph., Sturny V. and Arcangeli J-P, 2006. Evaluation of Economic Viability and Benefits of Urban Water Reuse and its Contribution to Sustainable Development, Water Practice & Technology, Vol. 1, No. 2, IWA Publishing 2006.

López de Alda, M., y D. Barceló. 2008. Contaminantes orgánicos emergentes en aguas continentals y aspectos relacionados con el marco normativo y planificación hidrológica en España. En: *Aguas Continentales. Gestión de recursos hídricos, tratamiento y calidad del agua*. Coord. D. Barceló. Madrid. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 276 pp. Madrid. 2008.

Martin D., Bélanger D., Gosselin P., Brazeau J., Furgal Ch. and Déry S., 2007. Drinking Water and Potential Threats to Human Health in Nunavik: Adaptation Strategies under Climate Change Conditions, ARCTIC, Vol. 60, No. 2, pp 195– 202, June 2007.

Meuleman A. F. M., Cirkel G. and Zwolsman G. J. J., 2007. When climate change is a fact! Adaptive strategies for drinking water production in a changing natural environment, Water Science & Technology, Vol. 56, No. 4, pp 137–144 Q IWA P, 2007.

Mueller U. and Witte M., Techneau, 2007. Ceramic membranes, Case related protocol for optimal operational conditions to treat filter backwash water, DVGW Water Technology Center (TZW), May 2007.

Nghiem L. and Hawkes S., 2007. Effects of membrane fouling on the nanofiltration of pharmaceutically active compounds (PhACs): Mechanisms and role of membrane pore size, Separation and Purification Technology, Volume 57, Issue 1, 1, Pages 176-184, October 2007.

Ogier J., Harmsen D., Siegers and W., Abrahamse A., 2008. Fenton process for Contaminant Control Investigation of OH radical formation with two water types,Techneau, D2.4.1.2, July 2008.

Parsons S., Jefferson B. and Christopher N., 2009. Sustainable Water: Chemical Science Priorities, DRAFT Royal Society of Chemistry report Chapter 3 – Water treatment, http://www.rsc.org/images/Chap3_tcm18-108478.pdf.

Peterson H., Pratt R., Neapetung R. and Steinhauer A., 2007. Development of Effective Drinking Water Treatment Processes for Small Communities with Extremely Poor Quality Water on the Canadian Prairie, Safe Drinking Water Foundation, Vol. 64, No. 1, Canadian Society of Environmental Biologists, Spring 2007.

PHYSorg, 2006. Water Filtration Technique Removes Dangerous Freshwater Algae Toxins, www.physorg.com/news75627930.html, 24 Aug 2006.

Radjenović J., Petrović M., Ventura F., Barceló D., 2008. Rejection of pharmaceuticals in nanofiltration and reverse osmosis membrane drinking water treatment, Water Research, Volume 42, Issue 14, Pages 3601-3610, August 2008.

Ramaker T. A. B., Meuleman A. F. M., Bernhardi L. and Cirkel G., 2005. Climate change and drinking water production in The Netherlands: a flexible approach, Water Science & Technology Vol. 51, No. 5, pp 37–44, Q IWA Publishing, 2005.

Ramírez A., Santacruz C., Garrido S., Fuentes M., Calderón C. y Montellano L., 2005. Análisis del costo de tratamiento en tres tipos de fuente para entregar agua potable a las ciudades de Guaymas y Ensenada, Proyecto IMTA, México, 2005.

Rantala, A., Fewer, D., Hisbergues, M., Rouhiainen, L., Vaitomaa, J., Börner, T., and Sivonen; K., 2004. Phylogenetic evidence for the early evolution of microcystin synthesis. Procedures of the National Academy of Science of the United States. Vol. 101, Issue 2, Pages 568-573. 2004.

Rivera Huerta M. L., Martín-Domínguez A., Piña Soberanis M., Pérez Castrejón S. y García Espinoza J., 2008. Optimización de un floculador acoplado a un reactor de electrocoagulación a flujo pistón para remoción de arsénico, XXXI Congreso Interamericano AIDIS, Santiago de Chile, Centro de Eventos Casa Piedra, 12 – 15 Octubre de 2008.

SEMARNAT, 2008. Atlas Digital Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Mexico 2008.

SEMARNAT, 2007. Datos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. México, Agosto 2007.

CAPITULO 9

Dimensión política y social de los problemas regionales del agua

Hilda Hernández Alvarado

Facultad de Ciencias Políticas y Sociales,
Universidad Autónoma de Coahuila

Índice:

Resumen
Abstract
Introducción
Objetivos
Metodología
El agua subterránea en la Región Lagunera
La problemática
Tensión
Deterioro
Las políticas del agua
La contradictoria racionalidad burocrática
La homogeneización de lo heterogéneo
La dimensión social
Los actores
El componente simbólico
Conclusiones
Literatura citada
Anexo

Resumen

La problemática regional del agua en su dimensión política alude a la doble connotación que enfoca a los factores de poder y al proceso de las políticas públicas, en su dimensión social refiere al carácter material y simbólico de las estructuras sociales. Ambas dimensiones se conjugan en La Laguna al configurar la problemática regional del agua en cuyo vértice se ubica la escasez como construcción social.

Abstract

The regional water problems in its political dimension refers to the double connotation that focuses on factors of power and the public policy process in its social dimension refers to the material and symbolic nature of social structures. Both dimensions are combined in La Laguna to set up regional water issues at the apex of which lies the shortage as a social construct.

Introducción

La Comarca Lagunera ubicada en el norte del país se caracteriza por una variedad de problemas relacionados con el uso, la explotación y la administración del agua. La relación entre las condiciones naturales de la región y las demandas y decisiones de los grupos sociales ha dado lugar a la presencia potencial y eventual conflicto abierto. La demanda y la extracción de facto de volúmenes superiores a la recarga, el incremento de la demanda derivado del dinamismo económico de la región, el establecimiento de decretos de veda que prohíben nuevas perforaciones para la extracción del agua, aunado al deterioro de las condiciones de vida del sector social de la producción agrícola configuran una realidad social caracterizada por el deterioro y la sobreexplotación del recurso, a lo cual se suman la competencia por el agua y los intereses económicos y políticos de los variados grupos sociales de la región. El análisis de la dimensión política pone en la mira a las organizaciones de la burocracia de los diferentes niveles de gobierno que intervienen en el diseño e implementación de las políticas del agua, en este ámbito las consecuencias no buscadas y ocasionalmente los efectos perversos del diseño o bien de la aplicación de las políticas públicas del agua constituyen tema prioritario.

La dimensión social de los problemas regionales del agua en la Comarca Lagunera enfoca a los actores sociales del agua, no sólo los que formalmente debieran ocupar un espacio en el espectro de actores vinculados al uso y manejo del agua. La dimensión simbólica deviene en tema para el análisis en tanto permite el acercamiento al mundo intersubjetivo de los actores relevantes del agua en la región, partiendo del supuesto de que las creencias, los valores y las ideas se expresan en las acciones prácticas que los actores actualizan en su cotidiana relación y apropiación del recurso.

Objetivos

El objetivo de este capítulo es en primer lugar caracterizar a la problemática regional del agua a partir del fenómeno de la escasez como una construcción social, fenómeno con el que se relacionan otros problemas como el deterioro de la calidad y la tensión entre los apropiadores del recurso. En segundo lugar se propone analizar el componente social y político del fenómeno cuyo análisis posibilita el acercamiento a la complejidad inherente a la trama de hechos y acontecimientos que dan lugar a la problemática del agua en La Laguna.

Metodología

El proceso para el desarrollo de la investigación cuyos resultados se presentan se fundamenta en al análisis documental de la perspectiva social, la revisión de documentos oficiales sobre el tema, el trabajo de archivo y la aplicación de entrevistas a personas involucradas.

El agua subterránea en la Región Lagunera

La problemática

La problemática del agua en La Laguna alude al conjunto de problemas concernientes a su uso y manejo, tales problemas refieren a los hechos o acontecimientos que producen o son resultado de la escasez hídrica. Un *hecho* alude a un estado de cosas, según Elster, refiere a "una instantánea temporal de una corriente de acontecimientos o una serie de tales instantáneas" (Elster *et al.*, 1996), mientras que, para el autor, los *acontecimientos* elementales en las ciencias sociales son las acciones humanas individuales, incluidos los actos mentales como la formación de creencia. En este sentido las acciones humanas constituyen la unidad básica de los acontecimientos, que a su vez configuran los hechos. La acción, en términos parsonianos, "es un proceso en el sistema actor-situación que tiene significación motivacional para el actor individual o, en el caso de una colectividad, para sus componentes individuales" (Parsons, 1999).

Es importante considerar que las acciones de los individuos y grupos tienen lugar en la continua relación, o más precisamente, en términos sistémicos, en la permanente interpenetración entre los sistemas vivos, psíquicos y sociales. En este contexto la relación entre la demanda social y la disponibilidad del agua en La Laguna pone en la mira a la relación entre el medio natural y social, como señala Parsons cuando refiere a su modelo AGIL al proceso de adaptación entre los componentes del sistema en tanto los grupos humanos se apropian y usan los recursos naturales en su beneficio, en este caso el agua.

Para Elster "que un bien sea escaso significa que no hay suficiente como para satisfacer a todos los individuos. La escasez puede ser (fuerte o débilmente) natural, casi natural o artificial." (Elster, 1994), para este autor la escasez es *natural* cuando no hay nada que alguien pueda hacer para aumentar la oferta y satisfacer a todos. La escasez *casi natural* surge cuando la oferta podría incrementarse hasta el punto de la saciedad, sólo mediante las acciones voluntarias de los ciudadanos, mientras que la *escasez artificial* se presenta cuando el gobierno podría, si así lo decidiera, según Elster, poner a disponibilidad de todos un beneficio al nivel de la saciedad. En este sentido la escasez del agua en La Laguna deviene en "casi natural", en este resquicio que, de acuerdo al *continuum* de la propuesta analítica de Elster, se encuentra precisamente la convergencia o interpenetración del sistema natural y social en virtud de que las condiciones naturales determinan para la región una disponibilidad del recurso que en sí misma no plantea situaciones problemáticas y sólo sobreviene como escasa en la dualidad natural/social. La disponibilidad natural del recurso está ligada a factores naturales como la precipitación pluvial, la evaporación o las características del suelo ligadas a la capacidad de recarga, tales condiciones determinan el volumen al que se puede tener acceso, sin embargo el hecho de que el volumen que se demanda del recurso se incremente hasta superar al disponible se convierte en un problema por la presencia de conflictos en la apropiación de un recurso que es insuficiente para satisfacer la demanda de todos los solicitantes. En La laguna acciones voluntarias de los usuarios de las aguas subterráneas como por ejemplo, limitar las extracciones del agua subterránea a los volúmenes concesionados; conservar la cuenca alta; destinar una parte del agua al acuífero y considerar al acuífero como un usuario

ambiental como lo establece la Ley de Aguas Nacionales, tendría (hipotéticamente) como resultado el incremento de la oferta de la misma. La Ley de Aguas Nacionales establece el siguiente orden de prelación para las concesiones y asignaciones de la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales: 1. Doméstico; 2. Público urbano; 3. Pecuario; 4. Agrícola; 5. Conservación ecológica o uso ambiental; 6. Generación de energía eléctrica para servicio público; 7 Industrial; 8. Acuacultura; 9. Generación de energía eléctrica para servicio privado; 10. Lavado y entarquinamiento de terrenos; 11. Uso para turismo, recreación y fines terapéuticos; 12. Uso múltiple y; 13. Otros (Comisión Nacional del Agua, 2004). Esta posibilidad de acciones a realizar de manera voluntaria por los usuarios del agua y su hipotético resultado evidencia la escasez casi natural del agua en La Laguna.

La escasez como construcción social se encuentra relacionada de manera directa con la presencia de otros rasgos y situaciones regionales, tales como el incremento en los niveles de arsénico en el agua de consumo doméstico, las tensiones y conflictos por los propietarios de derechos de agua, el fenómeno de la sobreexplotación del agua subterránea, el otorgamiento de concesiones que permiten la extracción de volúmenes superiores a la recarga natural de los acuíferos, la práctica de los usuarios de extraer volúmenes de agua superiores a los concesionados y establecidos en sus títulos de concesión, el creciente deterioro de la parte alta de la cuenca que determina la disminución de la recarga natural de los acuíferos y el cada vez mayor desabasto de agua a la población en cantidad y calidad suficiente.

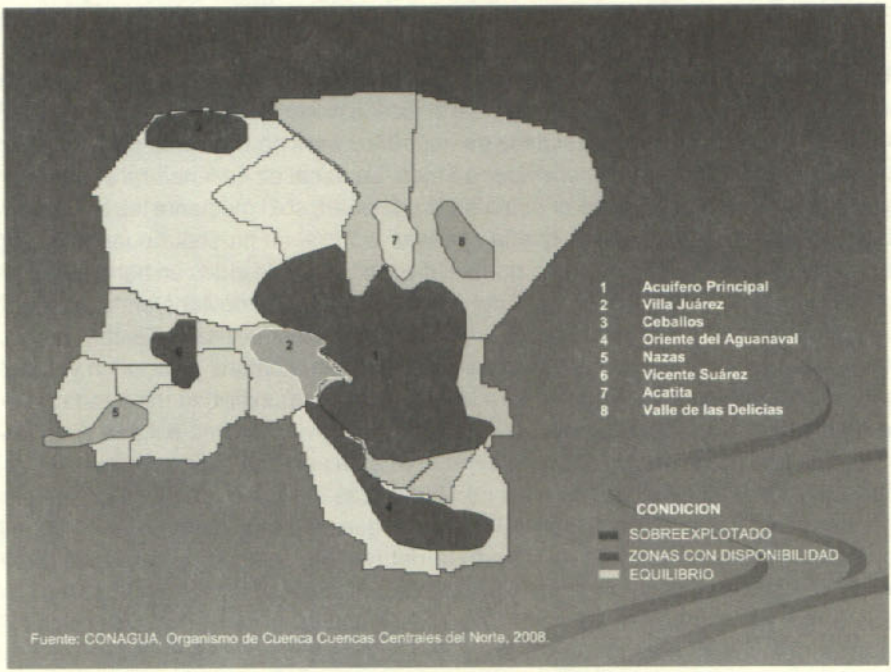


Figura 1. Condición de los acuíferos en la Región Lagunera (de acuerdo a Comisión Nacional del Agua, 2008)

Tensión

El establecimiento de la veda a nuevas perforaciones para la extracción del agua subterránea en La Laguna aunada a la creciente demanda del recurso destinado en su mayoría a la producción de forrajes ha provocado situaciones tensas en lo que concierne a la apropiación de los derechos de agua. Por un lado se encuentra la venta y renta de derechos de agua del sector social a la pequeña propiedad y, por otro lado, el señalamiento de los apropiadores del agua de los otros usos, fundamentalmente el industrial y urbano a los usuarios agrícolas sobre el beneficio privado y la exención de pagos[3] de que disfrutan. A la asimetría del mercado del agua se agrega la presencia de algunas situaciones de tensión y conflicto en algunas localidades ejidales de la región en las que con un menor o mayor grado de tensión interna se establecen acuerdos para vender los derechos de agua, tiempo después de realizada la transacción grupos de ejidatarios apoyados por asociaciones civiles campesinas intentan recuperar los Derechos, argumentando alteraciones en el proceso legal que institucionaliza la transacción, es decir, la transmisión de derechos. No obstante la situación descrita, las autoridades del agua plantean la conformación de Bancos de agua como recurso para evitar el acaparamiento y el merado negro del agua (SEMARNAT-CNA, 2009).

Un caso ilustrativo es el del Ejido El Estribo municipio de San Pedro Coahuila en donde un grupo de ejidatarios poseedores del título de concesión se fraccionó cuando los costos de operación y la deuda acumulada determinó que un sector renunciara a sus derechos para evitar pagar una deuda acumulada relacionada con el equipamiento y costos de operación de la noria. El sector de ejidatarios que continuaron con la posesión, se hizo cargo de los costos mencionados, manteniendo el beneficio de la extracción del agua. Posteriormente este grupo vendió sus derechos a un pequeño propietario de la zona. Tiempo después los antiguos propietarios, quienes habían renunciado a sus derechos, reclamaron su propiedad. La situación derivó en la intervención de la Central Independiente de Obreros Agrícolas y Campesinos (CIOAC) como aliado del grupo que se auto reconocía como despojado; una demanda formal ante la Procuraduría General de la República; expresiones violentas entre los dos sectores; división de los pobladores de la localidad a favor o en contra de uno de los dos grupos; deterioro de los lazos sociales en una comunidad pequeña caracterizada por las relaciones de parentesco y la creciente percepción de los habitantes de la localidad respecto a que la situación conflictiva derivada de la pugna por los beneficios de la posesión y venta de los derechos de agua determina la presencia de afectaciones a la salud y hasta fallecimientos de algunos miembros de la localidad.

Deterioro

A finales de la década de 1970 la Directora General en Jefe de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente presidió la reunión de un Grupo Interinstitucional. Conformado por integrantes de la misma dependencia, así como de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas; de la Dirección General de Servicios Coordinados de Salud Pública en los Estados y de la

Escuela de Medicina de la Universidad Autónoma de Coahuila. El propósito de la reunión era darle seguimiento a los estudios que pretendían precisar las características y magnitud del problema de arsenicismo y formular programas a corto y largo plazo. En la minuta de la mencionada reunión se plantearon como puntos sobresalientes los siguientes hechos: que los reportes de arsenicismo crónico en humanos datan de 1952; que la revista Salud Pública de México mayo-junio de 1964 documentó el caso de una defunción humana en 1962 vinculada al arsénico; que una tesis publicada en 1973 analizaba el caso de una localidad que registró signos de arsenicismo crónico; (hiperqueratosis palmoplantar en 14% y 31.7% de discromías), en 6,014 bovinos de 11,000 existentes en 25 establos; de los cuales 1,500 murieron; 1,396 registraron secuelas de intoxicación por arsénico y 3,118 sanaron. La presencia de 0.07 partes por millón de arsénico en la leche y la queja de un grupo de vecinos de Finisterre, en enero de 1977, de afectación a la salud por la ingestión de arsénico. (Fondo Comisión de Conurbación de la Laguna, 1977a).A finales del mismo mes se estableció, en el Documento "Contaminación con arsénico en la zona de La Laguna, Estados de Coahuila y Durango" que: "La contaminación con este elemento en la Comarca Lagunera ha adquirido caracteres alarmantes a últimas fechas. Tratándose de una sustancia de la naturaleza y cuya acumulación es debida a fenómenos geológicos de gran magnitud, es de suponerse que no ha habido un enriquecimiento súbito de los depósitos de arsénico sino que por prácticas en el aprovechamiento de otro recurso, el agua, se ha provocado una contaminación peligrosa que se hace ya urgente detener". (Fondo Comisión de Conurbación de La Laguna, 1997b).

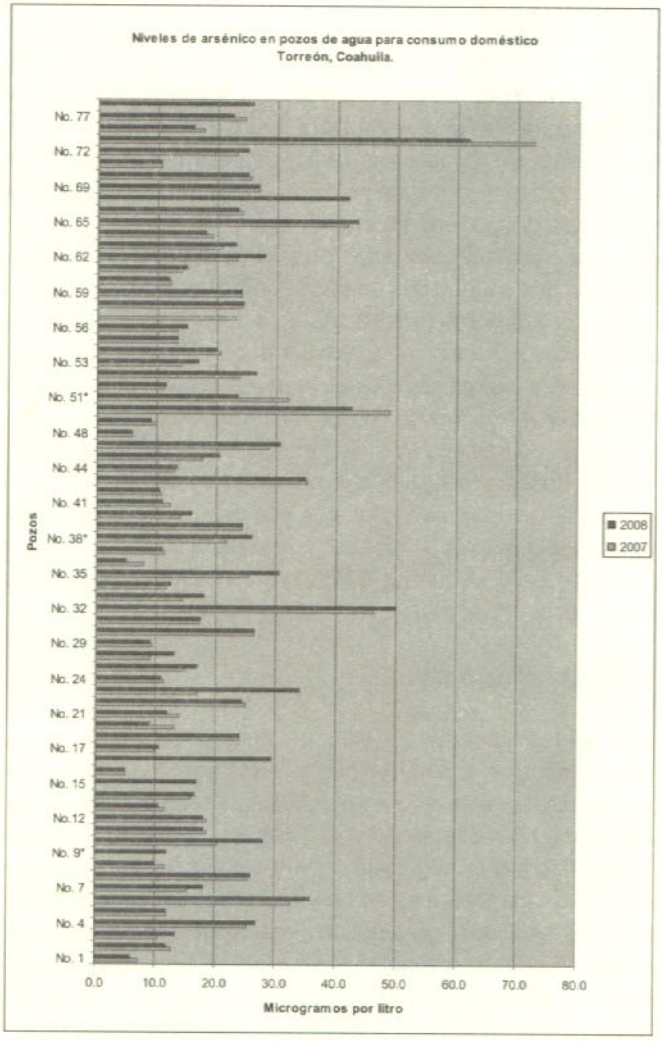
En la década de 1970 y 1980 el registro de la presencia de arsénico se ubicaba en algunas localidades rurales principalmente de los municipios de Francisco I. Madero y San Pedro de la Colonias en lo que corresponde a La Laguna de Coahuila. Este fenómeno se extiende ya a la Zona Metropolitana de La Laguna. En la actualidad cerca de la tercera parte de los pozos que abastecen de agua a la ciudad de Torreón registran niveles de arsénico superior a la norma nacional (25 microgramos por litro) y el 88% tienen niveles de arsénico superior a la norma internacional (10 microgramos por litro). (Ver cuadro 1).

El fenómeno del hidroarsenicismo ha propiciado en distintos momentos la aparición de tensión y conflicto en la interpenetración entre el ámbito del Estado y la Sociedad Civil. En la década de 1980 el señalamiento y difusión de la presencia de daños a la salud en habitantes de localidades rurales de los municipios de Francisco I. Madero, San Pedro y Tlahualilo por parte de grupos de la ciudadanía, tal situación se pretendió solucionar con el cierre de los pozos que abastecían de agua a dichas localidades y con la instalación de un sistema interestatal para su abastecimiento.

Este sistema se mantiene en vigencia y opera de manera deficiente en lo que concierne a la cantidad de agua que provee, en tanto en algunas localidades el agua fluye de manera permanente pero en exiguo volumen, mientras que otras localidades a tal limitación se agrega el tandeo que frecuentemente se incumple al no abastecer a los hogares aún en los días de la semana en que de acuerdo a la calendarización debería hacerlo. La instalación del sistema antes descrito permitió bajar el nivel de tensión en la interpenetración descrita y posibilitó un período de latencia de la tensión derivada del hidroarsenicismo, que se manifiesta nuevamente a partir del reconocimiento de la presencia del fenómeno en el

área urbana de la región que constituye la zona metropolitana de la laguna, nodo regional por su importancia económica y demográfica. Si bien la presencia de organizaciones civiles con temas hídricos y ambientales data en algunos casos de la década de los noventa, originadas en parte por la situación antes descrita, recientemente ha surgido una diversidad de ellas interesadas fundamentalmente en el problema de la "escasa" disponibilidad y su relación con la sobreexplotación y la concentración de derechos y, por otro lado, en los crecientes niveles de arsénico en el agua que se consume en los hogares de la región.

Cuadro 1 Niveles de arsénico en el agua potable de Torreón Coahuila (fuente: Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento de Torreón (SIMAS)



Las políticas del agua

En sus reflexiones sobre la política, Hanna Arendt pone a la *acción* en el centro de atención. Al establecer un contraste entre acción, labor y trabajo como dimensiones de la condición humana. Para esa autora la labor se liga a la necesidad, a la producción de todo lo necesario para mantener vivo al organismo humano y a la especie, mientras que el trabajo es productivo en tanto sus resultados se destinan, más a ser usados que a ser consumidos. (Arendt, 1997); señala que la acción humana es el inicio de una cadena de acontecimientos y afirma que "los humanos tenemos el extraño poder de interrumpir los procesos naturales, sociales e históricos, puesto que la acción hace aparecer lo inédito" (Arendt, 1997). Para la autora "la política, en sentido estricto, no tiene tanto que ver con los hombres como con el mundo que surge entre ellos" (Arendt, 1997). Este mundo se construye en la relación e interacción entre los hombres, los que de manera individual o colectiva asumen posturas y actúan en consecuencia. En este contexto analizar la dimensión política de los problemas del agua en la región lagunera conlleva a observar las interacciones que se establecen entre los actores individuales y colectivos vinculados al uso y manejo del agua en la región, quienes establecen interacciones en el ámbito de lo político como proceso de las políticas públicas del agua y de las relaciones de poder, ambos relacionados de manera directa.

En la acepción de política pública, mejor dicho de política gubernamental, las líneas de acción respecto al agua plantean dos situaciones potencialmente conflictivas en el ámbito de lo social: la racionalidad burocrática y la homogeneización en el diseño y aplicación de las políticas del agua subterránea. Oszlac y O' Donell (citado por Cardozo y Esteso, 1982) definen la gestación de políticas públicas como el surgimiento objetivo de un problema en la sociedad civil que al transformarse en "cuestión socialmente problematizada" es captada por el Estado, el cual toma una posición al respecto y busca su solución. (Cardozo y Esteso, 1982). Sin embargo en México la estructuración de la agenda, aún cuando se registra un incremento paulatino de participación social, son los acuerdos internacionales y la estructura gubernamental los que tiene el papel preponderante en la iniciativas, por tal motivo el adjetivo de "públicas" atribuido a las políticas no corresponde con el esquema analítico convencional del proceso de las políticas públicas, sino más bien el de "gubernamental".

La contradictoria racionalidad burocrática

Formalmente la racionalidad burocrática involucra la ejecución y el control operativo e impersonal basados en los criterios determinados por los organigramas, los manuales de funciones, los planes y los programas, sin embargo en el funcionamiento de facto de las organizaciones burocráticas se yuxtapone tal racionalidad y la dinámica operativa sustentada en un acervo especializado de conocimientos configurada por los propios funcionarios que frecuentemente se contrapone a lo que los planes, programas y manuales postulan (Hernández, 2007). Los intereses personales, las inercias y las prácticas instituidas se convierten frecuentemente en obstáculos a la operación burocrática del modelo ideal *weberiano* (Weber, 1984), de tal manera que la actuación burocrática deviene en dos formas de desviación, la primera de ellas alude a los efectos perversos de la aplicación de los postulados de la políticas a implementar,

la segunda refiere al énfasis en los medios en detrimento de los fines, lo que resulta en el burocratismo de la organización.

En el primer sentido habrá que señalar, como ejemplo, que la participación social aparece en las políticas del agua como una de las líneas prioritarias para lograr la preservación del recurso, el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales establece que la Comisión Nacional del Agua "promoverá y apoyará la organización de los usuarios del agua para que coadyuven y participen en la explotación, uso o aprovechamiento racional de las aguas nacionales y en la preservación de su cantidad y calidad..." (CNA, 2004).

La participación de los usuarios en el manejo del agua tiene lugar de acuerdo a las disposiciones federales a través de los Consejos de Cuenca y sus órganos auxiliares, uno de ellos es precisamente el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) cuyo objeto es "... la formulación, promoción y seguimiento de programas y acciones que contribuyan a la estabilización y recuperación de los acuíferos sobreexplotados, así como a la preservación de aquellos que se encuentran en equilibrio o cuentan con recargas mayores a sus extracciones" (SEMARNAT / CNA, 2001).

El cinco de septiembre del año 2000 se instaló el COTAS del Acuífero Principal en La Laguna, entre los argumentos justificantes se señaló que el Acuífero Principal es afectado por la escasez, el desorden en la distribución (extracción) y contaminación, cuyas principales causas son: perforaciones y aprovechamientos clandestinos; demanda superior a la recarga; intensa presión social; poco esfuerzo por hacer eficiente el uso y aprovechamiento del agua subterránea; escasa medición de las extracciones e insuficiente vigilancia; intensa competencia al interior y entre los distintos usos; desorden en el aprovechamiento; desinterés en la concertación de soluciones; mínima regulación y reglamentación. (CNA, sin fecha).

Desde la conformación inicial del Comité la burocracia del agua orientó una participación selectiva, previo a la conformación del COTAS se realizaron reuniones de usuarios por tipo de uso (agrícola, industrial, pecuario, público urbano y usos múltiples) a las que fueron convocadas figuras prominentes del sector productivo regional, en consecuencia los cargos del Consejo Directivo del COTAS recayeron en la élite regional. (Hernández, 2006). Ese fue el inicio de un proceso en el que se consolidaría el poder del mismo sector de usuarios en el COTAS, de tal forma que en la actualidad el Comité opera como un grupo cerrado de gestión al servicio de los grandes empresarios de la industria láctea. De esta forma el órgano colegiado responsable de atender el cuidado del agua subterránea en la región, es decir el COTAS del Acuífero Principal, paradójicamente consolida el poder de los usuarios que extraen y usan los mayores volúmenes de agua del acuífero contribuyendo así a la sobreexplotación, en virtud de que desde su formación y hasta la actualidad su órgano directivo ha estado conformado por prominentes empresarios lecheros, principales usuarios del agua del subsuelo.

A lo anterior se agrega un hecho que muestra cómo la instrumentación de acciones determinadas por la normatividad hídrica conlleva a estimular o por lo menos mantener el actual estado de cosas, es decir la sobreexplotación: la exención de pagos. Aún cuando el sector agrícola es el mayor usuario del agua, éste se encuentra legalmente exento de pago de cuotas a la expedición de títulos de asignación o concesión, permisos para la perforación de pozos, construcción de obras hidráulicas y modificación de títulos o permisos (CNA, 2005). Tal disposición configura un marco propicio para la sobreexplotación en la medida en que los usuarios del

agua de este sector, que es el que más extrae, no enfrenta limitaciones económicas en cuanto al pago de derechos como los otros usos.

La segunda forma de desviación de la racionalidad burocrática es la que enfatiza los medios en detrimento de los fines. La normatividad, los planes y programas establecen líneas de acción y medidas orientadas a preservar los acuíferos, en tal sentido el objetivo final es restablecer el equilibrio de los acuíferos sobreexplotados, de tal forma que de manera simple sería lógico suponer que un indicador del nivel de eficacia de la actuación burocrática sería el volumen extraído de aguas del subsuelo que tendría que disminuir, al menos en forma paulatina. Sin embargo la Comisión Nacional del Agua aparece, en la forma, como la promotora de la participación de los usuarios (que corrobora con datos de la creación y operación de Consejos de Cuenca y COTAS) e impulsora del uso eficiente del agua a través de los apoyos que brinda para la modernización de la infraestructura hidroagrícola. Aparece también como promotora del control de las extracciones vía apoyos económicos para la instalación de medidores volumétricos. No obstante lo anterior no hay una sola evidencia de que el proceso de sobreexplotación se revierta o mínimamente se detenga.

La homogeneización de lo heterogéneo

En el ámbito de las políticas del agua otro elemento que agudiza la problemática del recurso que podría derivar en situaciones conflictivas es la lógica de la administración en el nivel federal. Ello implica el diseño y aplicación de programas cuyo cumplimiento tienen como resultados no esperados la configuración de condiciones propicias para el mantenimiento o bien agudización de la condición de escasez del agua en la región, así como el diseño y aplicación de lineamientos normativos que contribuyen a tales condiciones, en tanto constituyen medidas de alcance nacional cuya ignorancia de las particularidades regionales pretenden la aplicación de reglas homogéneas en un espacio nacional caracterizado por la heterogeneidad.

Como sustento de las anteriores afirmaciones se presentan dos ejemplos: los decretos de regularización y el programa de prórrogas de las concesiones para la explotación, uso o aprovechamiento del agua. El Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) es la instancia de la Comisión Nacional del Agua encargada de mantener actualizado el registro y los movimientos concernientes a los derechos para el uso, explotación o aprovechamiento del agua otorgados a través de las concesiones y asignaciones. En este aspecto, el gobierno federal reconoce la situación irregular del registro de usuarios y emitió los decretos correspondientes para regularizar la situación de quienes sin contar con un título de concesión estaban extrayendo y usando el agua.

En octubre de 1995, el gobierno federal emitió tres decretos que otorgaban facilidades administrativas y condonaban contribuciones a usuarios de aguas nacionales y bienes públicos inherentes en actividades de carácter agrícola, silvícola, pecuario y acuícola, así como actividades industriales, comerciales y de servicios, al Distrito Federal, estados y Municipios (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1995). Estos Decretos tenían como finalidad además de la regularización antes mencionada, regularizar la situación administrativa y fiscal de los usuarios, lo que ligado a la inscripción en el REPDA tendría que instrumentarse en un plazo de un año, sin embargo al cumplimiento de éste, en octubre de 1996 se publicaron tres

nuevos decretos que prorrogaron la disposición mencionada a cumplirse como fecha límite el último día de diciembre de 1998 (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1996).

Un nuevo Decreto de Regularización se emitió en 2002 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002), en esta ocasión exclusivamente para el uso agrícola. Las concesiones otorgadas tienen una vigencia de diez años. Adicionalmente la Ley de Aguas Nacionales establece el derecho de los "nuevos usuarios" de solicitar la prórroga de sus concesiones por el mismo período de vigencia que su título de concesión ampara. Los decretos arriba señalados tienen un alcance nacional, homogeneiza al país en cuanto a su aplicación. Lo que podría visualizarse como una cualidad de la administración pública federal, sin embargo la situación diferencial de disponibilidad y calidad del agua en las diferentes regiones del país demanda en ocasiones la exención de la aplicación de ciertas disposiciones o, mínimamente, la adaptación y transformación de las disposiciones señaladas.

La no aplicación de procesos de regularización en La Laguna podría justificarse porque La Laguna es, en su totalidad, después de cinco subsiguientes decretos, una zona de veda en la que están prohibidas nuevas perforaciones para la extracción de agua subterráneas. En segundo lugar, precisamente las razones que justificaron en lo general el establecimiento de las vedas fue el incremento caótico y desordenado de las perforaciones en La Laguna. En tercer lugar la CONAGUA reconoce que el volumen concesionado es superior a la recarga, en cuarto lugar la Dependencia reconoce la presencia de extracciones de agua superiores a las concesionadas y en quinto lugar resulta contradictorio reconocer y otorgar concesiones al uso de agua cuyo origen tiene un carácter eminentemente ilegal, en tanto, para la Laguna se otorga una concesión a un usuario que ilegalmente extrajo y usó el recurso sin contar con un título, en una zona donde además está prohibido extraer el recurso y cuenta con un importante déficit en la relación recarga/extracción. No obstante, los procesos de regularización, se aplicaron en La Laguna al igual que en el resto del país.

El segundo ejemplo de la tendencia de homogeneizar lo heterogéneo son las disposiciones concernientes a las prórrogas. Las asignaciones o concesiones para el uso, explotación o aprovechamiento del agua tienen una vigencia no menor de cinco, ni mayor de treinta años. La Ley de Aguas nacionales establece que los asignatarios o concesionarios tienen el derecho de solicitar y eventualmente obtener prórroga a los títulos, hasta por igual término de vigencia por el que originalmente se hubiera emitido el título vigente, bajo las mismas condiciones (CONAGUA, 2002,).

Considerando el importante número de usuarios "regularizados" bajo el Decreto de 1996, antes del cumplimiento de los diez años por lo que se otorgaron los títulos de concesión, la Comisión Nacional del Agua desplegó una fuerte campaña de publicidad con la finalidad de persuadir a los usuarios a realizar el trámite de prórroga en tiempo. La campaña "Amarra tu agua" desarrollada por la CONAGUA llamaba a los usuarios de las aguas nacionales a revisar la carátula de su título de concesión para verificar la fecha de vencimiento y los invitaba a acudir a la ventanilla única a solicitar la prórroga en caso de que su fecha de otorgamiento oscilara entre 2006 y 2009, alertando sobre la posibilidad de perder la concesión en caso de no solicitar dicha prórroga.

Una vez más esta campaña aplicó para todo el territorio nacional, es contradictorio promover

la continuidad de las concesiones para la extracción de agua aún en zonas de veda y de acuíferos sobreexplotados como La Laguna, en tal situación el término de las concesiones parecería ser un escenario más pertinente, lo que sin duda tendrían también como resultado situaciones de tipo conflictivo. Cabe señalar, que de resultar inevitable la aplicación de tales medidas, parecería lógica la posibilidad de la aplicación de tales disposiciones con un enfoque de adaptación, considerando medidas como por ejemplo el otorgamiento de prórrogas bajo la condición de disminuir una parte proporcional del volumen concesionado originalmente, sin embargo el otorgamiento de las prórrogas no consideran las particularidades regionales en cuanto a la sobreexplotación y deterioro de la calidad del agua.

La dimensión social

El principal componente de la dimensión social de los problemas regionales del agua es precisamente el que refiere directamente a los factores que hacen posible el establecimiento de relaciones y conexiones que producen la realidad social, específicamente los actores y la comunicación. Los actores pueden ser individuales o colectivos, es decir personas, grupos, organizaciones e instituciones que se vinculan directa o indirectamente al uso y manejo del agua en la región. La comunicación, para fines de este estudio, es referida al proceso de intercambio discursivo que los actores realizan en torno a temas vinculantes, que para el caso de La Laguna refieren generalmente a la cantidad y calidad del agua. La diversidad de los actores sociales involucrados en el uso y manejo del agua permite que éstos sean aglutinados, por su actividad predominante, en los tres grandes ámbitos de la vida social, es decir, en el Estado, el Mercado y la Sociedad Civil, (Figura 2), mientras que por su incidencia en el binomio escasez/ sobreexplotación se agrupan en tres tipos: principales, secundarios e incidentales.

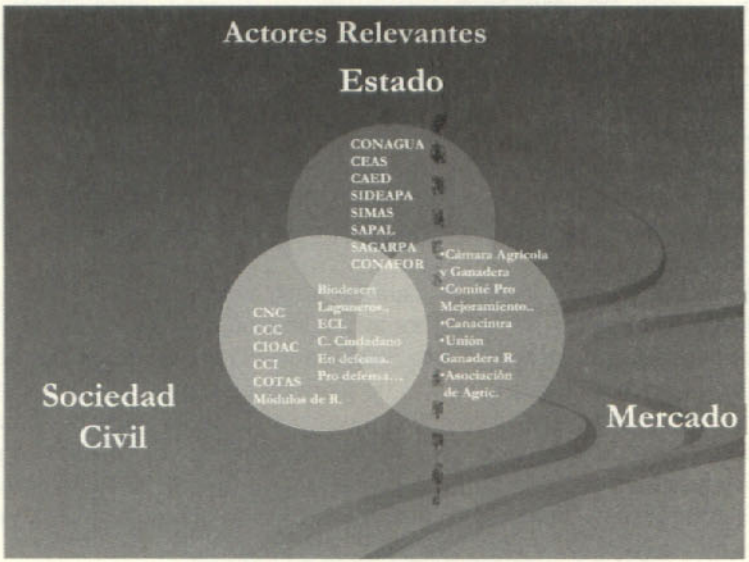


Figura 2. Esquema de actores relevantes (Anexo 1 para ver significado de siglas)

Los actores

Los actores sociales pueden ser estudiados desde la perspectiva micro-sociológica de Erving Goffman (Goffman, 1994) que establece la importancia del escenario en sus actuaciones. Aún cuando el autor prioriza en su análisis a la actuaciones de los actores en los encuentros cara a cara se retoma la idea del autor en cuanto a la expresividad del individuo como la capacidad para producir impresiones a través de dos tipos de actividad significante: "la expresión que da y la expresión que emana de él" (Goffman, 1994). En el primer tipo incluye los símbolos verbales y en el segundo un amplio rango de acciones consideradas sintomáticas. Para fines de este documento se enfocan las expresiones verbales de los actores sobre temas relevantes del agua. En lo que concierne a los actores sociales del vínculo escasez-sobreexplotación, tomando como punto de partida el paralelismo *goffmanino* de los actores en un escenario dramatúrgico, se plantea la presencia de actores principales, secundarios e incidentales. Los actores principales inciden de manera directa, por los recursos de asignación y autoridad que movilizan en las relaciones que establecen con los otros, en lo que concierne al uso, administración y control del agua cuyo rasgo fundamental es la sobreexplotación del agua subterránea. Los actores principales en este escenario son la Comisión Nacional del Agua, específicamente el Organismo de Cuenca de las Cuencas Centrales del Norte cuyo ámbito de administración incluye a la sub región Comarca Lagunera-Parras (SEMARNAT, 2006), el otro actor principal enfoca a los apropiadores de las aguas de uso agrícola cuyo volumen de extracción es superior en forma significativa al resto de los usos. En la Región Lagunera-Parras, el 90% del agua se destina al uso agrícola; 6% al público urbano, 1% al uso industrial y 3% al uso pecuario. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2006. Los usuarios agrícolas del sector privado en la región se encuentran organizados fundamentalmente en la Cámara Agrícola y Ganadera, así como en la Asociación Ganadera.

La determinación de la relevancia de los actores mencionados se vincula a la posesión y manejo de recursos de autoridad y de asignación en la perspectiva de la teoría de la estructuración, la cual refiere a los actores como agentes cuya capacidad de movilización de recursos los habilita para incidir en el flujo de hechos y acontecimientos sociales (Giddens, 1995). En este marco los recursos de autoridad de la Comisión Nacional del Agua posibilitan a los funcionarios a nivel individual, así como a la institución a nivel colectivo a influir o determinar en menor o mayor medida en el flujo de acontecimientos vinculados al recurso agua, mientras los agricultores privados en la región poseen capacidad y poder de incidir, resultado de la yuxtaposición de ambos tipos de recursos aunque en este caso son los recursos de asignación los que se encuentran en la base de dicho poder.

Por otro lado, los actores secundarios son grupos y organizaciones que se vinculan al manejo del recurso e inciden en el binomio escasez/sobreexplotación por su relación indirecta y un menor poder para incidir el mismo. En el tercer nivel del escenario se encuentran los actores incidentales, aquellos que aun teniendo escasos recursos de poder, pretenden incidir en el proceso descrito. La presencia de estos tres tipos de actores en la región se muestra en el mapa de la Figura 3.

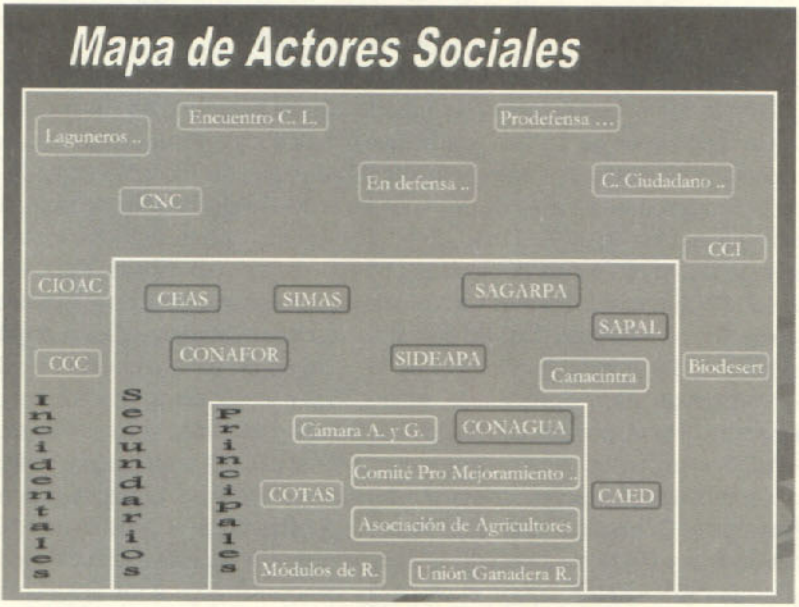


Figura 3. Mapa de actores sociales (Anexo 1 para ver significado de siglas)

El componente simbólico

Los discursos de los actores sociales del agua expresan una trama de signos y significados relativos a la cantidad y la calidad del agua y, por otro lado al impacto y al futuro de la región. El tema de la cantidad es abordado por los actores sociales del agua en la región al señalar dos factores problemáticos, la insuficiente o deficiente información sobre la disponibilidad del agua y el señalamiento al fenómeno de la concentración de derechos de agua. En el primer caso la cantidad del agua que se extrae, el volumen que se recarga y la disponibilidad de la misma son temas respecto a los cuales la Comisión Nacional del Agua posee y ofrece información, sin embargo ésta es cuestionada por diversos actores utilizando variadas explicaciones, por ejemplo, los productores agrícolas privados cuestionan el dato oficial sobre la disponibilidad del acuífero que expresa de manera contundente la condición de sobreexplotación del acuífero Principal de la región. Mientras que la Comisión Nacional del Agua señala la necesidad de información para sustentar decisiones relacionadas con el control de las extracciones, tal es el caso por ejemplo de la necesidad de información confiable para comprobar las extracciones de volúmenes de agua superiores a los concesionados.
La cantidad del agua en la región también es tema articulador de los discursos de los actores respecto a la concentración de derechos. Las explicaciones de los actores sociales varían en función de la posición en la estructura social y por consiguiente de sus intereses y creencias. Los productores agrícolas del sector social señalan el acaparamiento de los derechos del agua, así como el carácter ilegal de las transmisiones de los mismos, mientras que los productores agrícolas privados explican el mismo hecho como un proceso natural

bajo la consideración de que sólo la posesión de grandes volúmenes de agua hace rentable la actividad agrícola.

El deterioro de la calidad del agua constituye otro de los temas que acaparan la atención de algunos de los actores sociales del agua, particularmente la de las organizaciones sociales, si bien en la década de los ochenta el fenómeno del hidroarsencisimo en la región movilizó de manera importante a algunos grupos sociales, principalmente los vinculados con el sector ejidal del área de Francisco I. Madero y San Pedro Coahuila. Una vez "resuelto", como se describió en el apartado referido a "la problemática", el problema en las localidades afectadas a través de la operación de un sistema interestatal que permitió cancelar los pozos de agua con altos contenidos de arsénicos localizados en la mismas localidades para ser abastecidos por dicho sistema, el tema permaneció latente, para reaparecer en el escenario regional ante la evidencia de que el fenómeno ha alcanzado ya a los municipios del área conurbada de La Laguna conformada por los municipios de Torreón, Gómez Palacio y Lerdo, los cuales concentran la actividad económica y demográfica de la región. La sobreexplotación del agua subterránea es precisamente la explicación que de manera privilegiada utilizan los actores para referirse al fenómeno. El señalamiento de una importante cantidad de pozos que registran niveles superiores a la norma nacional e internacional es otro de los temas recurrentes en el discurso de los actores.

El impacto social del fenómeno de la sobreexplotación del agua se visualiza en la región en la polarización y el conflicto. La primera de ellas alude a la comparación entre el éxito económico de la industria lechera y el deterioro de las condiciones de vida de los ejidatarios del sector social en tanto éstos últimos se integran al sistema lechero regional al aportar la mano de obra, la venta de la tierra y la renta o venta de derechos de agua, o bien la producción de forrajes cuyo destino final es el propio sistema. El conflicto gira principalmente en torno a los derechos de agua, en una variedad de casos los antiguos apropiadores del sector social intentan recuperar los derechos de agua, vendidos a la pequeña propiedad argumentando el carácter ilegal de las transmisiones de derechos, proceso formal en que culmina la mencionada venta. Finalmente el futuro aparece como tema recurrente, en tanto la incertidumbre y hasta el manejo alarmista del tema por los medios de comunicación refieren al futuro amenazado de la región por la escasez y deterioro del recurso.

Conclusiones

La complejidad de la problemática del agua en la Comarca Lagunera puede ser observada a partir de una variedad de elementos y factores que confluyen para dar forma a los hechos y acontecimientos que caracterizan a la dinámica regional. En este capítulo se han observado algunos de los problemas que constituyen el entramado de la problemática regional, como recurso metodológico se tomó como punto de partida a la escasez vinculada directamente con la sobreexplotación. Se concibe a la escasez como un producto social en la medida en que alude a la incongruencia entre demanda social y disponibilidad natural. La observación del ámbito social y político permite señalar la presencia potencial y real de tensión y conflicto derivado de las decisiones y las prácticas de los actores sociales del

agua. En este contexto es posible derivar algunas conclusiones generales. El fenómeno de la escasez es resultado de una serie de decisiones que los grupos humanos toman en el proceso de apropiación y uso del agua. La complejidad inherente a las decisiones de los grupos humanos obliga a la búsqueda de soluciones diversas y en distintos niveles.

La problemática del agua en la Comarca Lagunera tiene como problemas articuladores a la escasa disponibilidad y el deterioro de la calidad del agua, ambos problemas son resultado de múltiples factores que se han conjugado a través del tiempo, entre los cuales destaca el diseño y la implementación de las políticas del agua, cuyos efectos no esperados han configurado en la región el ambiente propicio para la continuidad de la sobreexplotación y deterioro de la calidad del recurso.

Esta problemática impacta de manera directa en el acontecer de la región, específicamente en las acciones e interacciones de los grupos sociales que devienen en actores relevantes del uso, explotación y manejo del agua. En este contexto se han configurado condiciones particulares que originan situaciones de tensión y eventual conflicto abierto.

La observación de la problemática abordada y su expresión en la dimensión política y social permite delinear algunos planteamientos básicos orientados a atender algunos factores que de facto estimulan tal problemática. En lo que concierne a la dimensión política, la propia política federal incluye la propuesta de transversalidad, su aplicación real y efectiva puede convertirse en el detonador de nuevas prácticas en el diseño y aplicación de las políticas del agua. La transversalidad entre sectores de las políticas públicas, entre niveles de gobierno y adicionalmente entre unidades administrativas de las organizaciones vinculadas directamente e indirectamente con el manejo y uso del agua mostraría sin lugar a duda la necesidad de diseñar y aplicar programas congruentes con las condiciones particulares de la región. Por otro lado, el reconocimiento de los efectos no esperados permitiría la retroalimentación del proceso de instrumentación de planes y programas vinculados al agua.

El análisis de la dimensión social del impacto de la problemática descrita, en el componente simbólico y en el de las interacciones sociales permite visualizar cómo factores a atender al espacio de la comunicación y al de las interacciones entre actores relevantes del agua, la búsqueda de una forma de comunicación libre de distorsiones, como lo plantea Habermas (Suarez Molano, 2006), aparece como deseable pero al mismo tiempo como compleja y portadora de importantes dificultades en su puesta en operación en un espacio concreto caracterizado por la presencia de una diversidad de actores con igualmente diversos intereses y capacidades de incidir en el flujo del devenir del recurso agua en condiciones de escasez como ocurre en la Comarca Lagunera.

Literatura citada

Arendt, Hanna. 1997. ¿Qué es la política?, Editorial Paidós, España. P. 18, 19, p.117

Cardozo Brum, Miriam y Esteso M. Roberto L. (1982), Análisis del proceso de las políticas públicas, octubre, Documento de trabajo No. 7, Administración Pública, CIDE, México D.F:

CNA, 2002. Ley de Aguas Nacionales y su reglamento. Comisión Nacional del Agua.México, D.F. p.53

CNA, 2004, Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. Comisión Nacional del Agua México. P.114, 135

CNA, 2005. Ley Federal de Derechos. Comisión Nacional del Agua, México D.F. p. 12

CNA, Sin fecha. Antecedentes, Justificación y Relatoría General del Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Acuífero Principal de la Comarca Lagunera, Comisión Nacional del Agua Gerencia Regional Cuencas Centrales del Norte, Unidad de Programas Rurales y Participación Social. Torreón Coahuila, México. P.2-3

CNA, 2008. Alternativas de Abastecimiento Futuro en la Región Lagunera. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte. Torreón Coahuila, México

Elster, Jon. 1994. Justicia local, Editorial Gedisa, Barcelona España 311p

Elster, Jon. 1996. Tuercas y Tornillos. Una introducción a los conceptos básicos de las ciencias sociales. Editorial Gedisa, Barcelona España. 178p

Fondo Comisión de Conurbación de la Laguna, 1997a. Minuta de la 1ª. Reunión del Grupo Interinstitucional, México, D. F., 7 de junio de 1977. Centro de Documentación Eduardo Guerra, Torreón, Coah. Expediente C15E20

Fondo Comisión de Conurbación de la Laguna, 1997b. Documento anexo al Oficio del Director General de la Secretaría de Obras Públicas al Asesor Técnico del C. Subsecretario de Asentamientos Humanos, México, D. F., 22 de julio de 1977, Centro de Documentación Eduardo Guerra, Torreón, Coah., Fondo Comisión de Conurbación de La Laguna, Expediente C2E26

Giddens, Anthony. 1995. La constitución de la sociedad. Editorial Amorrortu. Buenos Aires Argentina 412p

Goffman, Irving. 1994. La presentación de la persona en la vida cotidiana. Editorial Amorrortu. Buenos Aires Argentina 412p

Hernández Alvarado, Hilda. 2006. Participación social para la sustentabilidad del agua subterránea en La laguna. En: Vázquez García, Verónica, Soares Moraes, Denise; Rosa Regalado, Aurelia de la; Serrano Sánchez, Ángel (Coord.) 2006. Gestión y cultura del agua, Tomo II, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-SEMARNAT-Colegio de Posgraduados, México. 190-215

Hernández, Hilda. 2007. *Política y sobreexplotación del agua subterránea en México, del diseño federal a la implementación regional.* En: Memorias del III Congreso Iberoamericano sobre

Desarrollo y Ambiente (CISDA), Heredia, Costa Rica Noviembre 2007.

Parsons, Talcote. 1999. El sistema social. Editorial Alianza. Madrid España 534p

SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca). 1995. Decreto mediante el cual se otorgan facilidades administrativas y se condonan contribuciones a los usuarios de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, que realicen actividades de carácter agrícola, silvícola, pecuario y acuícola. Diario Oficial de la Federación, 11 de octubre de 1995. México D.F. pp 7-14

SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca). 1996. Decreto que reforma el Diverso publicado el 11 de octubre de 1995, mediante el cual se otorgan facilidades administrativas y se condonan contribuciones a los usuarios de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, que realicen actividades de carácter agrícola, silvícola, pecuario y acuícola. Diario Oficial de la Federación, 11 de octubre de 1996. Mexico D.F. pp 25-31

SEMARNAT. 2001. Programa Nacional Hidráulico 2001-2006 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, México D.F. p. 21

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Decreto por el que se otorgan facilidades administrativas para la regularización de usuarios de aguas nacionales que realicen actividades de carácter agrícola. Diario Oficial de la Federación. 4 de febrero de 2002. México D.F. pp 2-24.

SEMARNAT, 2006. Programa Hídrico del Organismo de Cuenca de las Cuencas Centrales del Norte, Visión 2030. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Comisión Nacional del Agua. México D.F. 206p

SEMARNAT. 2009. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) "Evitar el acaparamiento y mercado negro del agua, objetivo fundamental de los Bancos de Agua". Comisión Nacional del Agua. Comunicado de Prensa No. 105-09. Disponible en línea www.cna.gob.mx [2009, 29 de junio].

Suárez Molano, José Olimpo. 2006. Crítica a la razón en la filosofía del siglo XX. Universidad de Antioquia, Colombia. 184p

Weber, Max. 1984. Economía y sociedad. Editorial Fondo de Cultura Económica. México.

Anexo

Anexo 1 Siglas de instituciones y organizaciones citadas

Asociación de Agricultores de la Región Lagunera del Estado de Durango
Biodesert A. C.
CAED Comisión de Aguas del Estado de Durango
Cámara Agrícola y Ganadera de Torreón A.C.
CANACINTRA Cámara Nacional de la Industria de la Transformación
CCC Central Campesina Cardenista
CCI Central Campesina Independiente
CEAS Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento de Coahuila
CIOAC Central Independiente de Obreros Agrícolas y Campesinos
CNC Confederación Nacional Campesina
Comité Pro Mejoramiento del Agro Nacional, Región Lagunera de Coahuila y CONAFOR Comisión Nacional Forestal
CONAGUA Comisión Nacional del Agua
Consejo de Cuenca Nazas Aguanaval
Consejo Ciudadano por el Agua de la Comarca Lagunera A. C.
COTAS Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Acuífero Principal
Encuentro Ciudadano Lagunero
En Defensa del Ambiente A. C.
Laguneros por el Agua
Prodefensa del Nazas A. C.
SAGARPA Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SAPAL Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Lerdo
SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIDEAPA Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Gómez Palacio
SIMAS Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento
UCD Unión Campesina Democrática
Unión Ganadera Regional de La Laguna

CAPITULO 10

El mercado de agua en la Comarca Lagunera

Manuel Fortis Hernández[1,4], Juan Antonio Leos Rodríguez[2],
José Alberto García Salazar[3], Enrique Salazar Sosa[4,1], Pablo Preciado Rangel[1],
Miguel Ángel Segura Castruita[1] y Jorge A. Orozco Vidal[1].

[1]Instituto Tecnológico de Torreón
[2]Universidad Autónoma Chapingo
[3]Colegio de Postgraduados
[4]Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia

Índice

Resumen
Abstract
Introducción
- Reforma al artículo 27
- Reforma a la Ley Nacional de Aguas
- Ley de Aguas Nacionales de 1992
- Mercado de los derechos del agua
- Distritos de Riego
- Alcances
- Debate internacional sobre los mercados de agua
- Condiciones para un mercado formal del agua
- Tipos de mercados de agua
- Indisociabilidad de los derechos de uso del agua y la tierra
- Afectaciones a terceros
- Formas organizativas del mercado y de revelación de los precios
- Distintos modelos de mercados de aguas: regulaciones, ventajas e inconvenientes
- Bancos de agua en México

Materiales y Métodos
- Localización del área de estudio
- Situación actual de la Comarca Lagunera

Resultados
- Valor de la producción
- Oferta de agua
- Demanda de agua

Conclusiones
Literatura citada

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo analizar el mercado de agua en la Comarca Lagunera y su impacto en la competitividad y uso del agua en las actividades productivas que se desarrollan en esta región, haciendo énfasis en las actividades agrícolas.
La implementación del mercado de agua aunado a las condiciones de escasa disponibilidad de este recurso, debería haber incrementado la competitividad agrícola en la región, elevado la tecnificación y modernización de los sistemas de producción y desarrollado una cultura del uso racional del recurso. El estudio se llevó a cabo en el área de influencia del Distrito de Riego (DR) 017 que concentra el 83% del total de la superficie irrigada en esta región. Se analizó información estadística con técnicas econométricas a fin de evaluar el impacto de dicho mercado. Los resultados muestran que la operación del mercado de agua en la región no ha modificado la estructura productiva agrícola ya que en los últimos 14 años los cultivos forrajeros ocuparon los mayores volúmenes de agua; sin embargo, sus beneficios económicos y eficiencia están entre los más bajos. El mercado de agua sigue propiciando por múltiples vías la reconcentración del recurso y la especulación de su valor económico, reflejando la debilidad de sus estructuras como mercado.

Abstract

The present investigation had as objective to analyze the water market in the Comarca Lagunera and its impact on the competitiveness and use of the water in the regional productive activities, making emphasis in the agricultural sector.
The implementation of the water market combined with the conditions of little availability of this resource, allow us to assume that agricultural competitiveness, technology upgrades and modernization of the productive systems have increased in the region, and in the meantime the water resources utilized by agriculture were best allocated among the competing demands to efficiently produce food, feed and fibers in order to conserve the resource base. The study area was the Irrigation District (ID) 017 that concentrates 83% of the total irrigated land in this region. Statistical information was analyzed with econometric techniques in order to evaluate the impact of the water market. The results show that the operation of this market has not modified the agricultural productive structure because fodder crops increased water consumption in the last 14 years; nevertheless, their economic benefits and efficiency are low. The water market continues favoring the concentration of the resource and the speculation of its economic value, through different ways reflecting the malfunctioning of its operative mechanisms.

Introducción

El nuevo orden económico internacional, caracterizado por una mayor apertura económica y mayor competitividad comercial, además de la privatización en todos los sectores de la economía, ha llevado a los países a la adopción de normas de eficiencia y calidad. En el caso de México, la transformación agraria y económica ha seguido este esquema de liberación mundial, dirigida a descentralizar y comercializar la agricultura, lo que ha implicado cambios de fondo en sus leyes, en las instituciones y en los esquemas para la administración y comercialización en este sector (Fortis *et al.*, 2002).

Parte de este proceso ha sido la transferencia de los sistemas de riego del sector público a los usuarios iniciada en 1989, al mismo tiempo que se reformó el Artículo 27 Constitucional, referido a la privatización de derechos de propiedad de la tierra, y la Ley Nacional de Aguas que permite la transmisión de derechos de agua para animar a los productores a cultivar bajo los mecanismos del libre mercado.

Con la creación de la Comisión Nacional del Agua (CNA) en 1989, se pretendió concentrar en este organismo, la administración integral del agua y el cuidado de la conservación de su calidad, además que tuviera a su cargo las actividades de planeación, construcción, operación y conservación de las obras hidráulicas. Sin embargo, ante la falta de recursos económicos y presupuéstales para una operación más eficiente y más productiva la CNA al hacerse cargo de los distritos de riego (DR) en el año de 1989, estableció la política encaminada a que la operación, la conservación y la administración se transfiriera a los propios usuarios para lograr así la autosuficiencia financiera y un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles. En diciembre de 2007 se habían transferido el 99% de la superficie total de los DR; solo tres no habían sido transferidos a los usuarios; el 003 (Tula), 018 (Colonias Yaquis) y 100 (Alfajayucan) (CNA, 2008).

Son muchos los factores que deben concurrir con suficiencia y oportunidad para hacer una agricultura de riego sostenible; uno de los factores importantes, sino el que más, es el agua, recurso que debe utilizarse con toda racionalidad, pues mientras que se dispone con suficiencia no se le da el debido valor hasta que el incremento en la demanda, el desperdicio, la contaminación, su degradación y el agotamiento de las fuentes cercanas lo convierten en el centro de las preocupaciones de la población que lo requiere.

El agua superficial es muy variable en el tiempo y el espacio; en México y para muchos Distritos de Riego existen restricciones por la falta de agua, llegando en ocasiones a disminuir la superficie con derecho a riego, condición que está vinculada a la presencia de lluvias en las cuencas de captación de las presas del país o en las propias zonas agrícolas.

En este sentido, en el año de 1995 se implementó el Programa Hidroagrícola 1995-2000 de la CNA, que tenía como objetivo favorecer el aprovechamiento del agua para el desarrollo de las actividades agrícolas y reducir los impactos negativos de esta actividad en el ambiente. Este plan tenía como principales componentes, la construcción, rehabilitación y modernización de la infraestructura; el apoyo a la transferencia de los Distritos de Riego a los usuarios; el desarrollo parcelado; el uso eficiente de la infraestructura, del agua y de la energía; la protección de las áreas productivas, la reparación y adquisición

de maquinaria para la conservación de la infraestructura concesionada; y el mercadeo de derechos de agua, este último como "el elemento detonador para modernizar y hacer eficiente la agricultura de riego" (CNA,1995).

La comercialización del agua no significaba únicamente la compraventa de derechos de agua, sino que buscaba propiciar la reactivación de la agricultura de riego, ya que implicaba también la tecnificación y modernización de los sistemas de producción, procurando desarrollar una cultura sobre el uso racional del agua en los agricultores mexicanos.

Si la escasez de agua es una realidad en las condiciones actuales de utilización, se supone que bajo un sistema de libre mercado reflejaría su valor real, lo que obligaría a utilizar sistemas más eficientes de conducción y de aplicación del riego parcelario, a utilizarla sólo asociada a tecnologías de producción adecuadas al cultivo, aspectos aún mejorables en forma importante mediante la reconversión productiva, orientada hacia productos de mayor densidad económica o bien destinar su uso a otras actividades más remunerativas (Guajardo *et al.*,1997).

Tradicionalmente en el país la asignación de derechos por uso o aprovechamiento del agua o por el suministro de servicio del líquido han sido a través de un sistema de aprovechamiento que ha obedecido a criterios distintos, todos de tipo administrativo, que se fundamentan en diversas doctrinas de derecho público y se resumen en los principios del derecho ribereño, el de apropiación previa, el orden "legal" de prelación y el de interés público y más recientemente la Ley de Aguas Nacionales y su reglamento plantean la idea de que se tendrá preferencia por la asignación del agua, cuando haya varios interesados: el que ofrezca mejores términos y condiciones de aprovechamiento, racionalidad y un mayor beneficio social y económico (Bravo y Ortiz 2000).

El mercado de los derechos de agua se ha venido dando de manera informal por mucho tiempo y en la actualidad está operando bajo una nueva estructura legal. Desde el año de 1992, con fundamento en la Ley de Aguas Nacionales y su reglamentación de enero de 1994, se permitió la transmisión de derechos derivados de las concesiones o asignaciones de aguas superficiales dentro de una misma cuenca, o de aguas del subsuelo dentro de un mismo acuífero, siempre y cuando estuvieran vigentes e inscritos los títulos de concesión, asignación y permisos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).

Sin embargo, en la actualidad todavía existe mucha controversia y preocupación de comercializar un recurso tan esencial para la producción agrícola, ya que no se adapta fácilmente a los mecanismos del mercado y el agua en el campo tiene una función social y política, sobre todo en lugares como la Comarca Lagunera donde existe escasez de este recurso, lo cual pudiera traer limitaciones a la hora de comercializarlo.

Reforma al artículo 27

La modificación neoliberal del artículo 27 Constitucional y la nueva Ley Agraria, decretadas en los primeros meses de 1992, constituyen, sin duda, la más profunda reforma del estado surgido del contrato social que emanó de la Revolución Mexicana de 1910 y cristalizó en la Constitución Política de 1917. Más aún, desde la perspectiva de la historia

agraria de este país, así como del análisis del alcance y de la forma en que se impuso la reforma ésta parece que cancela el contrato social agrario de la Revolución Mexicana (Calva, 1998).

La reforma al artículo 27 constitucional y la nueva Ley Agraria, representan una verdadera revolución del marco jurídico-agrario para la producción agropecuaria, cuyo objetivo esencial consiste en revertir el creciente minifundio en el campo, con el fin de estimular una mayor inversión y capitalización de los predios rurales, que eleven la producción y productividad.

Revertir el minifundio, significa inducir la concentración de la tierra en explotaciones agrícolas de mayor tamaño. Para este efecto, el nuevo artículo 27 constitucional y su Ley Reglamentaria abren amplias vías a la circulación mercantil de la tierra y a su compactación en medianas y grandes unidades de producción que operarán en un régimen de economía abierta (Ley Agraria, 1992). Por lo que esta reforma neoliberal podría afectar en esencia las raíces del productor ejidal nacional: al suprimir el carácter inalienable, inembargable e imprescriptible de la propiedad de las tierras.

Reforma a la Ley Nacional de Aguas

En México, dadas las condiciones agroclimáticas siempre ha existido la necesidad de desarrollar una agricultura bajo condiciones de riego. En la década de 1920 se inicia la construcción de las grandes obras de irrigación. La legislación sobre este particular se ha ido ajustando a las características de cada época; así han surgido diferentes leyes que han regulado la administración y la gestión de este recurso, entre las que destacan:

Ley sobre Irrigación y Aguas Federales de 1926.
Ley de Aguas de Propiedad Nacional de 1929, una actualización en 1934, así como su Reglamento en 1936.
Ley de Riegos de 1947.
Ley Reglamentaria del párrafo quinto del artículo 27 Constitucional en Materia de Aguas del Subsuelo.
Ley Federal de Aguas de 1971.
Ley de Aguas Nacionales de 1992.
Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales de 1994.

Es importante señalar que en 1971, con la Ley Federal de Aguas, se legisló en el sentido de que únicamente la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SARH) podía construir, operar, conservar y mantener los sistemas de riego, propiciando con esto una cultura en los usuarios de dependencia del subsidio, situación que limitó la modernización de este subsector. En 1992 se actualizó la Ley incorporando cambios importantes, que se convertirían en oportunidades para apoyar la reconversión productiva.

Ley de Aguas Nacionales de 1992

Esta Ley se emitió con la finalidad de dar un marco jurídico adecuado a las condiciones actuales del entorno nacional y para asegurar un ordenamiento de los recursos hidráulicos; contempla todos los usos del agua y contiene importantes disposiciones que regulan la explotación de las aguas de riego del país.

Uno de los aspectos más importantes de esta nueva legislación, es que permite bajo ciertos límites, la comercialización de los derechos de agua. En su artículo 65 indica que los Distritos de Riego serán operados, mantenidos y conservados por los propios usuarios, para lo cual el Gobierno Federal, a través de la Comisión Nacional del Agua, concesiona los derechos de agua y en su caso la infraestructura pública necesaria a las personas morales que se constituyan con este propósito (artículo 33), se plantea la idea de que se tendrá preferencia por la asignación del agua, cuando haya varios interesados: el que ofrezca mejores términos y condiciones de aprovechamiento, racionalidad y un mayor beneficio social y económico.

En el PND (1994) se señalaba que con estos cambios se observaría la oportunidad "para impulsar la modernización de la agricultura de riego como elemento detonador, al propiciar una mayor participación de la inversión privada en la explotación y aprovechamiento racional de los recursos hidráulicos".

Mercado de los derechos de agua

Un mercado eficiente del agua obliga a manejar derechos de agua medibles, lo que significa utilizar dotaciones de tipo volumétrico. De hecho, la Ley ya contempla el concepto volumétrico en su artículo 21, donde en las solicitudes de concesión, se debe anotar el volumen requerido. También el artículo 52 y 106 del Reglamento de Ley indican que los concesionarios o asignatarios deberán contar con los medidores para el volumen de agua utilizada. La Ley de Aguas Nacionales dedica una serie específica de artículos relacionados con la transmisión de los derechos de agua, que comprenden del artículo 33 al artículo 37 de dicha Ley; además el mismo tema se trata en otros artículos y en el reglamento respectivo publicado en enero de 1994.
El instrumento que puede impulsar la comercialización del agua es el Título de Concesión de Derechos de Agua para el caso del agua de pozo o de derechos de riego reconocidos por la CNA, el cual es divisible y no necesariamente está ligado a la tierra. La prueba de su existencia se rige por su inscripción en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), instancia que deberá haber en cada entidad federativa.

La transmisión de los derechos de explotación puede ser parcial o total, tanto dentro como fuera del Distrito (artículo 70), siempre sujetándose al Reglamento de Ley. Asimismo, en los artículos 49 de la Ley y 88 del Reglamento, se indica que la transmisión de derechos en Unidades y Distritos de Riego podrá ser temporal o definitiva. Será temporal

cuando se transfieren por determinados ciclos agrícolas, conservándose la titularidad de la concesión; y será transmisión definitiva cuando se cede la titularidad de los derechos en forma definitiva.

Distritos de Riego

En los Distritos de Riego, según el artículo 70 de la Ley y 104 del Reglamento, la transmisión de derechos puede ser parcial o total, temporal o definitiva. La transmisión total o parcial de los derechos hacia fuera de los Distritos de Riego se estipula en el artículo 70 de la Ley, donde debe contarse con la mayoría de la asamblea, pero además se requiere: que el adquirente de los derechos asuma la construcción de la infraestructura hidráulica adicional para que no se afecte la operación del Distrito; y que exista la autorización de la CNA para la transmisión de derechos. La transmisión entre los propios usuarios de una misma asociación, sociedad o a terceras personas que los sustituyan como usuarios en los mismos terrenos se efectuará sin mayor trámite. Cuando sea en terrenos distintos se sujetará a las modalidades que señale el reglamento específico del propio Distrito.

Alcances

Diversos especialistas en la materia (FIRA, 1998; Fortis *et al.*, 2002), señalan que el marco legal del mercado del agua trae consigo muchas oportunidades y amenazas que se deben estudiar, entre estas se pueden mencionar las siguientes:

Oportunidades:
Impulsar la tecnificación del riego y por ende su optimización.
Adquirir a su valor real el derecho de agua en forma paulatina, suscitando el uso racional.
Generalizar los métodos de entrega por volumen.
Hacer más eficiente la agricultura de riego.
Incrementar la productividad y la generación de empleo.
Reactivar las empresas agrícolas actualmente subutilizadas.
Consolidar empresas exportadoras.
Reconvertir los módulos de riego en empresas administradoras de agua y prestadoras de servicios financieros.
Propiciar mayor número de empresarios con capacidad gerencial.
Generar mayor demanda en la adquisición de derechos de agua.
Inducir la participación de la iniciativa privada en infraestructura de riego.
Encaminar mayores flujos de capital hacia obras hidráulicas.

Amenazas:
Peligro de acaparamiento de derechos con fines especulativos.
Compra por parte de inversionistas con poca solvencia moral.
Fomentar indirectamente la sobreexplotación de los derechos de agua por efecto del libre mercado.
Pérdida de soberanía alimentaria (producción de granos básicos) por destinar el agua a

los cultivos de alta rentabilidad financiera.

Debate internacional sobre los mercados de agua

En la actualidad existe un nuevo criterio de proteger los recursos naturales bajo un sistema de mercado, esto es parte de un gran debate internacional que tiene como objetivo fundamental analizar la asignación de derechos de propiedad bien definidos de los recursos que sean compatibles con su preservación y dejar que los propios usuarios establezcan el modo más eficiente y menos costoso de efectuar su utilización, proporcionando al mismo tiempo, incentivos a su protección y preservación.
El fundamento de este enfoque radica en la hipótesis de que los mercados pueden preservar los recursos sí todos sus participantes asumen plenamente el costo de reposición de su actividad, es decir, el valor de lo que debe renunciarse para emprender la actividad en cuestión (CEPAL, 1995).

Los mercados que funcionan en forma satisfactoria suelen ser mecanismos eficaces para asignar los recursos entre los diferentes usos y a través del tiempo. Para que los mercados funcionen bien, es preciso que se cumplan ciertas condiciones esenciales, por ejemplo, los derechos de propiedad sobre los recursos deben ser claros y seguros, se deben manejar en mercados activos que les asignen un precio de acuerdo con la oferta y la demanda, las decisiones no deben tener efectos colaterales negativos apreciables y es preciso que la competencia prevalezca. Si estas condiciones no se cumplen, el mercado libre no podrá asignar con eficacia los recursos entre los distintos usos y a través del tiempo. En ese caso, se gastarán demasiados recursos hoy y se dejará muy poco para el futuro (Panayotou, 1997).

Gran parte de la mala administración y el uso ineficaz de los recursos naturales y del ambiente se puede atribuir a que los mercados funcionan mal, están distorsionados o son del todo inexistentes. Los precios generados por esos mercados no reflejan los verdaderos costos y beneficios sociales que implica el uso del recurso. Esos precios trasmiten información desorientadora acerca de la escasez de los recursos y no brindan incentivos adecuados para la administración, el uso eficaz y la conservación de los recursos naturales.
Las fallas más importantes del mercado que afectan el uso y la administración de los recursos naturales, entre otros, son los derechos de propiedad mal definidos o no existentes, recursos sin precio y mercados inexistentes, los altos costos de transacción que desalientan los intercambios benéficos, que en otras condiciones permitirían conservar los recursos y aumentar el bienestar social (entre esos costos destacan los de información, negociación, vigilancia y cumplimiento) y las imperfecciones del mercado, sobre todo la falta de competencia a causa de monopolios, oligopolios y mercados segmentados en la localidad (es decir, mercados fragmentados a causa de barreras físicas o políticas para la movilidad de los recursos, lo cual impide un reparto equitativo de los dividendos) (Fortis y Ahlers, 1999).

La incertidumbre y las imperfecciones del mercado no sólo están entrelazadas entre sí, sino también con ciertos factores, socioeconómicos y socioculturales, tales como la política, la pobreza, las costumbres y el modo de percibir las cosas. Por motivos históricos, políticos y socioculturales, muchas de esas fallas del mercado están más generalizadas y son más pertinentes en algunas regiones que en otros.

En el caso del agua, es un recurso sin precio en el cual el estado tomo la decisión deliberada de proveer agua de riego a los agricultores en forma gratuita o a una tarifa nominal. En tal situación, no sólo el agua es un recurso natural escaso, con un costo de oportunidad positivo, el que carece de precio (o tiene un precio nulo), sino también el capital escaso que se invierte en los sistemas de riego (Donoso *et al.*, 2004).

Todos los países sostienen en sus constituciones que las aguas son patrimonio inalienable e imprescriptible de una nación. Lo que un Estado puede por lo tanto otorgar son derechos de uso de aguas y vertimiento en las mismas. Ambos derechos deben estar normalmente sujetos a pagos, plazos y caducidad. Son derechos reales de tipo administrativo.

El mercado de aguas, se limitaría por lo tanto a un mercado de derechos de uso y vertimiento y las compraventas estarían sujetas a no causar daños a terceros ni al medio ambiente. Lo que obliga a que los derechos de agua deben estar inscritos en un registro público para que pueda existir un mercado como tal (Perry *et al*, 1997).

El mercado en términos abstractos viene a ser un "ámbito" institucional donde se definen las responsabilidades de los usuarios y se solucionan sus conflictos, esperando que dicho mercado establezca una mejor asignación, mejore la eficiencia del uso y, racionalice el consumo de este recurso. Respecto a su valor este debe estar asociado a su costo de oportunidad y a su presencia física, la lógica lleva a la necesidad de implementar un sistema de mercado flexible.

Su precio variará, en función del costo de oportunidad y a su presencia física dentro de la cuenca hidrográfica pudiendo tomar incluso valores para los diferentes usos, en función del cambio de la calidad y cantidad, de la época del año y de situaciones hidrológicas extremas sean éstas favorables o desfavorables.

Entonces, los instrumentos de mercado a ser recomendados y diseñados deben incorporar la visión de gestión integrada de los recursos hídricos para poder asegurar su preservación, uso, recuperación y conservación y el desarrollo equilibrado y sustentable de cualquier región. Los instrumentos de mercado deben poder fortalecer el mercado de la mejor forma, con el objetivo de mantener el equilibrio entre la oferta (que es aleatoria) y la demanda (que es creciente), con la intención de compatibilizar los intereses de los diferentes usuarios.

Condiciones para un mercado formal de agua

Un mercado de agua existe cuando compradores (arrendatarios) desean intercambiar dinero por derechos de agua de gravedad y se ponen en contacto con vendedores (arrendadores) que desean intercambiar sus derechos por dinero. La existencia de un gran

número de compradores y vendedores garantiza la existencia de cualquier mercado.
La demanda es el factor clave de este mercado, ya que a través de sus análisis se pueden conocer con alguna precisión los volúmenes (derechos de agua medidos en metros cúbicos) que podrá absorber este mercado, en qué lugares y a qué precios. En cuanto a la oferta de derechos de agua, se puede decir que son las cantidades totales que los arrendadores están dispuestos y pueden vender a los distintos precios alternativos posibles, por períodos de tiempo distintos.
Los objetivos básicos de este mercado serían: redistribuir costos de la forma más equitativa; regular la demanda, aumentando la productividad y la eficiencia en la utilización de los recursos hídricos; financiar el plano regulador; fomentar el desarrollo regional integrado, en especial sus dimensiones sociales y ambientales. Para ello es necesario, analizar con profundidad los factores operacionales, económicos, sociales, culturales y políticos de largo plazo y mediano plazo de la cuenca, sin perder de vista la expansión urbana, industrial o agrícola que puedan comprometer la disponibilidad del recurso hídrico.
Diversos autores (Panayotou, 1997; Ahlers *et al.*, 1998 y WWF/Adena, 2005) señalan, que para que los mercados de agua tengan los resultados mencionados, algunas condiciones serían necesarias, por ejemplo;

Derechos de agua bien definidos.
Suficientes vendedores y compradores.
Bajos costos de tramitación o transacción.
Participantes bien informados.
Reglamentación legal para evitar efectos a los derechos de terceros.
Infraestructura física que permita la movilidad del agua.
Demanda para un uso que arroje mayores ingresos.
Administración de la re-asignación del agua y efectos a terceros.
Garantía de equidad social y protección del medio ambiente.

En suma un mercado de derechos de agua para que sea eficiente deberá cuando menos cumplir las siguientes características; flexibilidad, seguridad y predictibilidad y por lo tanto los derechos de propiedad deben de tener las características de ser específicos, exclusivos, transferibles, integrales y exigibles.

Tipos de mercados de agua

Existen muchas evidencias de intercambios informales de aguas en muchas zonas agrícolas del mundo, por ejemplo: India (Saleth, 1996), Egipto (Bowen y Young, 1986), Pakistán (Rianudo *et al.*, 1997), España (Pérez *et al.*, 1996), México (Ahlers *et al.*, 1998), sin embargo, aquí solo se revisan aquellos mercados legalmente constituidos y regulados.
Para tal efecto pueden identificarse tres tipos fundamentales de mercados de aguas:
Mercados corrientes o de alquiler, que implican una venta de agua, caudal o volumen, por un tiempo determinado que puede llegar hasta los cinco años (en California; o, para

períodos más breves en Australia y, en proyecto, para Canadá y España).
Mercados de derechos, en los que la propiedad del agua se transfiere como si se tratara de propiedades sobre bienes raíces o de acciones sobre sociedades limitadas (Chile, Canarias o en algunos Estados del Oeste de EE.UU).
Mercados de opciones, mediante los cuales se transfiere la opción de usar el agua durante un tiempo determinado. Como ocurre en todo mercado de opciones, el que adquiere el derecho de opción no está obligado a ejercitarla pero sí a pagar el precio del derecho al vendedor. Si se ejecuta, el contratante de la opción ha de pagar al vendedor el precio de ejecución (Fisher *et al.*, 1997; Miller, 1996).

Transacciones de agua a cambio de inversiones en equipo de capital, en virtud de las cuales el comprador acepta financiar a su cargo unas inversiones en el equipo de utilización del vendedor a cambio de adquirir el derecho a apropiar los caudales ahorrados debido a estas mejoras (Maestu, 1997; Howitt, 1998).

Indisociabilidad de los derechos de uso del agua y la tierra

En el pasado, casi todas las legislaciones de aguas vigentes en los países que se han venido citando adscribían los derechos de uso de aguas superficiales a los derechos de uso de la tierra. En España la legislación vigente establece que un titular con predios separados y con derecho a usar al agua para el riego no está en general autorizado a usar caudales adscritos a un predio en el otro (Schmidt, 2005).

No es arriesgado afirmar que sin un mínimo de indisociabilidad entre tierra y agua el mercado de aguas es imposible que funcione. Tanto los intentos más conservadores de liberalizar la asignación de agua, como puede ser el de Canadá (Alberta) como los más radicales, como es el caso de Chile, han implicado disociar los derechos sobre el uso de la tierra y sobre el uso del agua. Ahora bien, el modelo chileno o el de casi todos los Estados del Oeste de EE.UU. (Batista, 1996), en los que ambos recursos están legalmente disociados, tiene el riesgo de que el sector agrícola, y todo lo que en el mundo rural rodea su actividad, vea sustancialmente reducido su tejido productivo como consecuencia de ventas masivas de aguas.
Como ocurre siempre en el diseño de políticas, es tal vez sensato proceder a la disociación entre agua y tierra de manera gradual para prevenir que los cambios tengan lugar de manera súbita. El tiempo de adaptación puede ser clave para contener a las fuerzas del mercado, cuyos efectos más negativos en situaciones no restrictivas se dejan sentir en zonas rurales poco competitivas.

Afectaciones a terceros

La naturaleza del recurso agua hace que los mercados de aguas sean especialmente proclives a ocasionar daños a terceros. De un lado, los intercambios pueden ocasionar alteraciones de los caudales entre puntos más o menos alejados de un mismo cauce y,

de tratarse de una transacción Inter.-sectorial, pueden también alterar la calidad de las aguas. En ambos casos, se puede anticipar un buen número de situaciones en las que usuarios no consuntivos, ajenos a las partes contratantes, puedan resultar perjudicados. Si hay usuarios de retornos, con o sin derechos sobre dichas aguas, también pueden resultar perjudicados por ventas de aguas. En todo caso, el alcance del concepto de afecciones a terceros será tan amplio que recoja también efectos negativos sobre el paisaje del dominio hidráulico y sobre el estado de los ecosistemas fluviales. En el estado de Nuevo México (EEUU) se ha conseguido reducir sustancialmente el número de conflictos generados por las transacciones de agua, mientras que en Colorado es mucho más proclive a que los conflictos se enquisten en los tribunales ordinarios de justicia (Howe, 1998).

Formas organizativas del mercado y de revelación de los precios

Centrándose exclusivamente en los mercados desarrollados al amparo de la Ley, se pueden identificar cuatro formas organizativas de mercados de aguas:

Subasta de agua. Empleadas en España para repartir caudales sobrantes de sociedad privadas de pozos o por empresas con licencia minera que tienen por actividad el bombeo y la venta de aguas (Ponce, 1992).

Mercado de derechos permanentes sobre el agua. Reproducen el esquema de los mercados de bienes raíces, en los que corredores o intermediarios cobran comisiones de las operaciones de compra-venta que consigan llevar a término.

Redes digitales que comunican a posibles compradores o vendedores de aguas. El proyecto Waterlink ya está produciendo en el valle de San Joaquín en el estado de California, intercambios de aguas entre regantes pertenecientes a la misma zona regable. El sistema funciona a través de Internet y los regantes, que han de instalar un programa en sus ordenadores personales, cumplimentan sus peticiones u ofertas de agua en espera de que el mercado encuentre un contratante con el que pueda intercambiar el agua. Se acuerda el precio y el sistema lanza la orden de la transacción para que el caudal vendido pueda llegar al comprador en la fecha pactada (Olmstead *et al.* 1997).

Centros públicos de contratación o creados en el seno de los organismos públicos en materia de aguas. En este supuesto el organismo público recibe las ofertas y peticiones de agua, y bien la tasa a un precio fijado por él y anunciado previamente o bien las tasa al precio que resulte del equilibrio entre la oferta y demanda. En casi todos los casos, el cambio de titular es registrado en el inventario de concesiones y titulares que suelen tener estos organismos públicos, a la vez que realizan las comprobaciones técnicas sobre la viabilidad del intercambio y la ausencia de afecciones a terceros. El conocido banco de aguas de California (EUA), en el que el Estado fija precios de compra y venta, sigue este modelo de intervención pública, razón que justifica que algunos expertos lleguen a

dudar que tal experiencia pueda concebirse así porque las decisiones de compra o venta son voluntarias.

Transmisión de derechos sobre el agua a cambio de la realización de obras hidráulicas o mejora de las instalaciones por parte del adquiriente. Como ya se ha mencionado, mediante este sistema el comprador acuerda financiar las inversiones necesarias para mejorar el equipo de capital hidráulico de la parte cedente con el fin de que ésta le ceda de manera permanente, temporal o sujeta a unas condiciones acordadas, una parte de sus recursos hídricos.

Distintos modelos de mercados de aguas: regulaciones, ventajas e inconvenientes

Para resumir las experiencias desarrolladas en el mundo y los principios rectores sobre los que se han implantado o regulado el mercado de agua se presenta en el Cuadro 1, las experiencias de mercados reales en funcionamiento. Con el propósito de poder comparar sus regulaciones se han seleccionado cuatro aspectos sustantivos de cada experiencia.

Bancos de agua en México

Finalmente, cabe hace mención de los llamados "Bancos de agua". En México, la figura se encuentra incluida en la Ley de Aguas Nacionales desde 2004 pero hasta ahora no se había puesto en práctica. "La Comisión Nacional del Agua podrá establecer definitiva o temporalmente instancias en las que se gestionen operaciones reguladas de transmisión de derechos que se denominarán 'bancos del agua', cuyas funciones serán determinadas en los reglamentos respectivos", señala el artículo 37 bis de la ley. El primero de dichos bancos opera en las instalaciones del organismo de cuenca de la región Cuencas Centrales del Norte. Esta región fue seleccionada para instalar el primer banco por sus características hidrológicas de escasez de agua y alta demanda; además por la importancia estratégica del recurso para la producción económica de la Comarca Lagunera, y por la existencia de un "mercado" de transmisión de derechos que opera de manera desordenada (CNA, 2008).

El banco de agua, proporcionará asesoría en el trámite de transmisión de derechos, emitirá dictámenes de factibilidad y proporcionará información confiable sobre la oferta y la demanda de líquido en la región. El banco de agua contribuirá a "blindar" las operaciones de transmisión de derechos de agua; en la práctica el primer banco del agua ayudara al usuario a adquirir volúmenes adicionales, a hacer intercambios de volúmenes industriales o agrícolas, de manera transparente, sin gestores, sin intermediarios, sin ningún tipo de cuestiones vinculadas a actos de corrupción. El Programa Nacional Hídrico 2007-2012 plantea como meta contar con doce bancos de agua en operación para el fin del sexenio.

Cuadro 1. Características básicas de los mercados de aguas en funcionamiento

País/ Región	Tipos de mercados	Derechos intercambiados	Provisiones específicas	Comentarios/Evaluación/Dificultades/Tendencias
Oeste de USA	Mercados sobre derechos permanentes intersectoriales	Derechos apropiativos con prelación.	Usuarios de retornos reconocidos. Algunos estados exigen aprobación técnica	No ha habido otra forma de asignación en los últimos 100 años Recientemente se han reconocido derechos no consuntivos para usos ambientales. En zonas concretas se ha dañado irreversiblemente la actividad agrícola. Algunos estados tienen medidas eficaces de protección frente a externalidades y afecciones a terceros. La heterogeneidad de los derechos dificulta la transparencia del mercado.
Banco de aguas en California	Bancos de aguas, organizado por el Estado de CA años 1991; 94 y 95	Derechos concesionados y derechos privados	Fuerte protección al Delta/Bahía de San Fco. Precios fijos, prelación de compradores.	Muy exitosa experiencia que ya se había concebido desde 1997. Al tener precios fijos de antemano: exceso de oferta de 30%. Agricultores vendieron. Ciudades y agricultores compraron. Tutelado, organizado y protegido legalmente por el estado de CA. Ambiente positivo. Problemas: poca dispersión de vendedores. Daños económicos concentrados en pocas zonas.
Australia	Mercados sobre sistema centralizado. Acompañado de reforma tarifaria.	Derechos concesionados convertidos en títulos de propiedad	Tasas al Intercambio; a veces, limitaciones cuantitativas.	Profunda reforma en la gestión y política de aguas del país. Problemas con gestión fragmentada de las cuencas Interestatales, como distorsiones del mercado por diferentes tarificaciones. Problemas con zonas salinas y acuíferos. Buen control y procedimiento de corrección de problemas. No muchos intercambios, pero potenciación de cultivos intensivos. En síntesis, un buen ejemplo para países que pasen de políticas muy centralizadas a mayor liberalización acompañado de tarifas recuperadoras de costos.
Chile	Sobre la propiedad del agua. Se autoriza: alquiler y uso como garantía de préstamos.	Derechos de propiedad, definidos como títulos de propiedad, bienes raíces.	Ninguna, salvo que la transacción implique un cambio del punto de toma sobre cauces naturales.	La más profunda liberalización de la gestión del agua que se conoce. Puntos positivos: protección de la agricultura intensiva, protección de los derechos sobre el agua y mejoras técnicas substanciales. Aspectos negativos: poder de mercado excesivo de las hidroeléctricas sobre regantes, acopio por parte de éstas de títulos de propiedad no empleados. Desprotección del medio ambiente; excesiva litigiosidad en tribunales con sentencias contradictorias: escasas posibilidades de revertir el proceso de privatización y, por tanto, de incorporar otros valores diferentes a los estrictamente económico/contables.
Canarias	Mercado segmentado en varios servicios; capacitación, transporte y distribución.	También no consuntivos. Privatización absoluta de las tres actividades.	Muy escasas, las que impongan otras regulaciones mercantiles.	Más de un siglo de historia. Aspectos positivos: eficiencia técnica en el empleo del agua, poco despilfarro, usos con señales sobre el costo de oportunidad. Aspectos negativos: omisión total del control de los acuíferos (sobre-explotación), mercados con monopolios (transporte de agua), poca transparencia, poca eficacia en el funcionamiento del mercado. Escasa disociación en mercados de aguas de distintas calidades.
India	Mercado de aguas subterráneas y de alquiler de equipos.	Derechos de facto sobre aguas subterráneas	Muy escasas, aunque se intenta implantar controles	Se aprovecha un vacío legal para intercambiar acceso a capacidad de bombeo y al agua extraíble. Nulo control hidrológico en la gestión de los acuíferos. Dispersión de información e incertidumbre sobre los efectos a largo plazo de los mercados.

En este sentido, los bancos de agua son instrumentos que contribuirán a regular el mercado de derechos de agua en México, coadyuvando al uso eficiente del recurso y revirtiendo la sobreexplotación del mismo. Estas instancias gestionarán operaciones reguladas de transmisión de derechos, lo que evitará el acaparamiento del recurso y la generación de rentas económicas (Figura 1).

Figura 1. Bancos de Agua (Fuente: CNA, 2009)

A 80 años de que el Gobierno Federal inició la política de riego en México, a 19 años de haberse iniciado la transferencia de los Distritos de Riego y 18 de haberse legalizado la comercialización de los derechos de agua, obliga evaluar los resultados de estos cambios realizados tendientes a cuidar y hacer un uso más eficiente de este recurso.

Materiales y métodos

Localización del área de estudio

Para lograr los objetivos planteados se consideró únicamente el Distrito de Riego 017, este concentra el 83% del total de la superficie regada en esta región. El Distrito de Riego 017 agrupa a 20 Módulos de Riego, 17 corresponden al Río Nazas y 3 al Río Aguanaval, con una superficie dotada de 190,721 ha que benefician a 33,158 usuarios (Cuadro 2). Para determinar la competitividad y usos del agua en la región se utilizaron algunos indicadores como; volúmenes de agua, superficies de cultivos, láminas de riego, rentabilidades, que fueron recopiladas a través de datos primarios, vía entrevistas, y secundarios de los actores involucrados en la administración y uso del agua. Además, se consideraron trabajos de

investigación más recientes que se han publicado en la Laguna. La información recopilada fue analizada y procesada, lo cual permitió calcular las Tasas Medias de Crecimiento Anualizada (TMCA) que sirvieron para hacer las proyecciones de los usos del agua. Cabe hacer mención que la totalidad de las aguas superficiales en la región son utilizadas con fines agrícolas exclusivamente y el volumen a utilizar para cada ciclo varía de acuerdo a los almacenamientos existentes en las presas. En la actualidad un ciclo normal de riegos representa una superficie de 87,240 ha que demandan un volumen de 1,345 millones de m^3 de agua.

Situación actual de la Comarca Lagunera

La Comarca Lagunera está ubicada al norte de México, comprende la parte suroeste del estado de Coahuila y el extremo noroeste del estado de Durango, se localiza entre los meridianos 102° 00' y 104° 47' longitud oeste y los paralelos 24° 22' y 26° 53' latitud norte. De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1981), los climas principales son de estepa (BS) y desértico (BW), los cuales van desde muy secos a secos y de muy cálidos a templados, con lluvias en verano en todos los casos.

Esta región consiste de un área de aproximadamente 24,000 kilómetros cuadrados, con un plano rodeado por una cadena montañosa. En esta área son doce municipios, con un área de aproximadamente 220,000 hectáreas. El Distrito de Riego de la Comarca Lagunera comprende una parte de la región. Este tiene un área máxima irrigable de aproximadamente 105,000 ha con una máxima normal de 96,000 ha, sin embargo, el área actual irrigada varía año con año, dependiendo de la disponibilidad del agua superficial. En el área de este distrito, la temperatura media anual es de 20.6° C con rango de 18.7 °C a 21.3 °C. La precipitación anual es 220 mm y la evaporación es 2473 mm al año. Por ejemplo, en el año 2007 en el DR 017 los usuarios registrados eran 33 360, con una superficie regada de 66 599 y un volumen distribuido de 945 223 Mm^3, en promedio la lámina bruta fue de 142 cm (CNA, 2008).

Resultados

La problemática principal detectada en esta región es la baja disponibilidad de agua que ha venido ocurriendo como efecto de las condiciones de tipo natural que se registran en la región como son: laminas de precipitación bajas y láminas de evapotranspiración altas. Tales condiciones limitantes se han visto agravadas por la acción del hombre, en la medida en que se ha incurrido en una explotación intensiva del recurso y poco racional. Otro factor que ha alterado a la región en cuanto a la disponibilidad de agua, es el cambio climático, reflejado en precipitaciones extraordinarias y sequías recurrentes que además de su prolongada duración alteran la producción agropecuaria y por ende la economía regional en su conjunto, propiciando problemas de tipo social, razón fundamental por la cual, es impostergable la formulación de lineamientos estratégicos para lograr un equilibrio del recurso agua por ser esta vital para el desarrollo sustentable de la región.

Cuadro 2. Número de usuarios, superficie regada, volumen distribuido y lámina bruta en el DR 017 (año agrícola 2006/2007).

	Ejidal	*Privada*	*Total*
Número de usuarios	*30 967*	*2 393*	*33 360*
Superficie regada (ha)	*50 441.4*	*16 157.6*	*66 599.0*
Vol. Dist. (Miles m³)	*715 902.5*	*229 320.1*	*945 222.6*
Lámina Bruta (cm)	*141.9*	*141.9*	*141.9*

A pesar de las limitaciones del recurso hídrico, se ha desarrollado una importante producción agropecuaria, ejemplo de ello, lo es la Cuenca Lechera que figura entre las más importantes de Latinoamérica, esto sin menoscabo de otras actividades agropecuarias, lo cual representaría un mayor éxito si no se tuvieran las siguientes situaciones: la generalidad de las prácticas de cultivos, tal como se llevan a cabo, demandan altos volúmenes de agua; históricamente el aprovechamiento ha sido deficiente tanto por factores tecnológicos, como por dispersiones parcelarias con sus consecuentes perdidas en los volúmenes de agua, y no se ha involucrado a los usuarios en una participación integral que los lleve a tener una percepción clara de la problemática que represente la escasez del agua, lo cual por otra parte explica la ausencia de una cultura de ahorro y uso eficiente del agua (CNA,1999).

Valor de la producción

En 2007, los sectores industrial y comercial de la Comarca Lagunera aportaron 92 % al Producto Interno Bruto (PIB) de la región, el cual se estimó en 27,233 millones de pesos de 1993; el restante 8 % fue aportado por el sector agropecuario. Durante el periodo 2000-2007 la tasa de crecimiento media anual del PIB industrial fue de 1.2 %, mientras que las de los sectores comercial y agropecuario fue de 4.5 % y 5.2 %, respectivamente (Figura 2). Si el PIB de la Comarca Lagunera mantiene el mismo comportamiento que mostró durante el periodo 2000-2007, se estima que para el 2010 éste indicador se ubicaría en 3,026 millones de pesos, lo que equivale a un incremento de 12.6 % con respecto al PIB registrado durante 2004 (García y Guzmán, 2007). Lo anterior ubicaría al PIB de la Región Lagunera en el orden de los 27,043 millones de pesos para el año 2010. Lo que preocupa es la baja eficiencia del sector primario en el uso de este valioso recurso (Figura 3). El Cuadro 3 presenta el valor de a producción agrícola y pecuaria durante los últimos años.

Cuadro 3. Valor de la producción del Sector Primario de la Comarca Lagunera

Sector	*2005*	*2006*	*2007*	*TMCA*
Agricultura	*2,604,136.6*	*2,710,214.9*	*3,704,763.0*	*12.4 %*
Pecuario	*14,573,518.0*	*15,890,998.0*	*16,740,047.0*	*4.7 %*

TMCA = Tasa media de crecimiento anualizado

Oferta de agua

En la Comarca Lagunera, el agua subterránea está distribuida en ocho acuíferos, de los cuales 4 están localizados en el estado de Durango, 2 en el estado de Coahuila y dos abarcan los dos estados. El principal acuífero provee más de las tres cuartas partes del suministro de irrigación; y tres acuíferos proveen cerca del 90 % del suministro. Cabe resaltar que en el año 2003 y 2008 el acuífero principal tenía un coeficiente de extracción/recarga de 1.79 (CNA, 2008); cuatro con problemas de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres.

Por otra parte, los ríos Nazas y Aguanaval son las principales fuentes de recarga de los acuíferos de la Comarca Lagunera pero el comportamiento de las avenidas es variable (Figura 4). Por el frente montañoso conformado por las sierras de San Carlos y el valle de Ciudad Juárez entran al subsuelo 110 millones de metros cúbicos de agua, producto de las lluvias y otros escurrimientos.

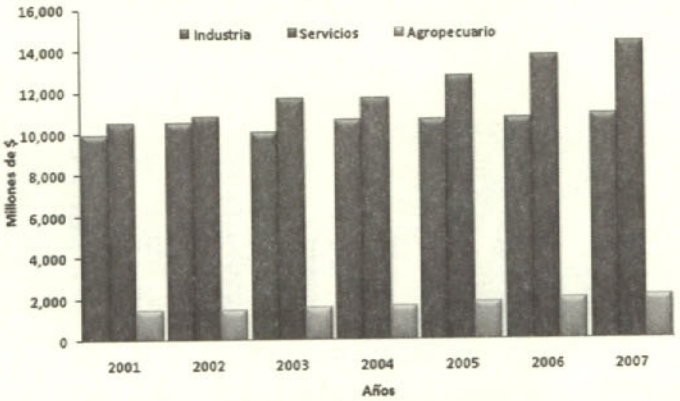


Figura 2. Comportamiento Sectorial del Producto Interno Bruto de la Laguna

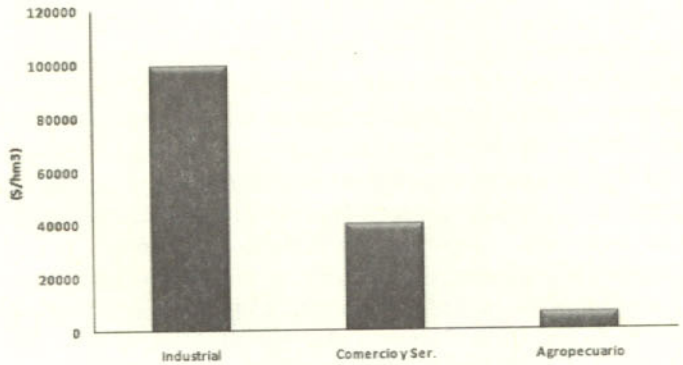


Figura 3. Eficiencia en pesos ($) por hectómetro cúbico de agua (hm^3) por sector Productivo en la Comarca Lagunera durante 2007

El cauce del Nazas aporta 50 Mm^3 al subsuelo, sólo que en ese trayecto se pierden 35 millones. De acuerdo a las estimaciones de la CNA por conducto del riego a tierras agrícolas retornan al acuífero 350 millones de metros cúbicos de agua limpia. Sin embargo, se mantiene la extracción de 1057 Mm^3 y los ríos han disminuido su aportación después de 1991 y 2008, años excepcionalmente lluviosos en que las avenidas suministraron un respiro al acuífero, pero no el suficiente como para mantenerlo en equilibrio. En el año 2005 el déficit de agua era de 183 hm^3 (García y Guzmán, 2007).

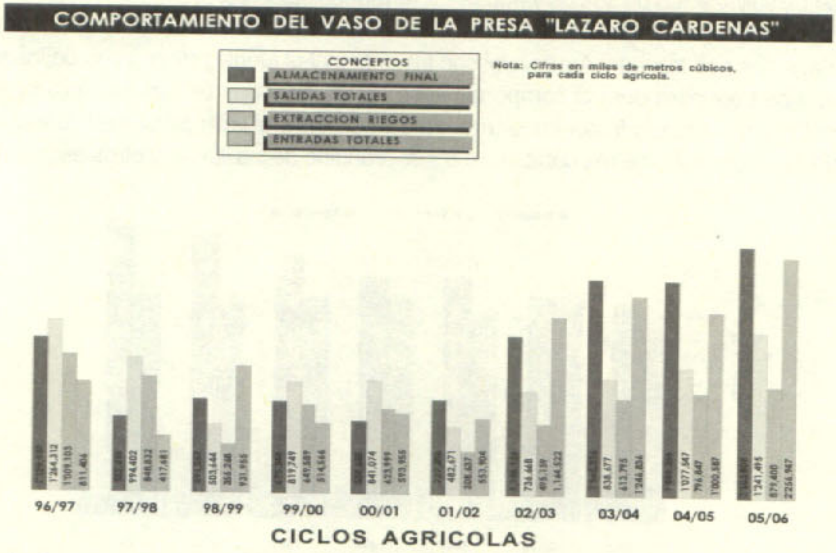


Figura 4. Comportamiento del almacenamiento histórico de la Presa Lázaro Cárdenas

Demanda de agua

Sector urbano e industrial

Pese a la preocupación de los sectores que extraen y utilizan el agua subterránea, el número de pozos, o aprovechamientos, aumentan velozmente. En 1994 se tenían registrados 3,007 pozos; en 1999 eran 3,887 pozos: en la parte de Coahuila 1,485 y en la de Durango 2,529. El volumen de extracción de dichos pozos era del orden de los 837 Mm^3. En el año de 2003 (Cuadro 4), existían en explotación 3,206 pozos "oficialmente", 1,909 en la región lagunera del Estado de Durango, y 1,297 en la región lagunera del Estado de Coahuila (García y Guzmán, 2007). Tan sólo 5 municipios, 3 de Durango y 2 de Coahuila, de los 15 que forman la Comarca Lagunera, concentran 65 % de los pozos: Lerdo 392, Gómez Palacio 500, Mapimí 478, Matamoros 381 y San Pedro 328. De los 3,206 pozos localizados en la región, 67.34 % (2,159) son usados por el sector agrícola, 18.22 % (584) tienen un uso múltiple (usados para el abastecimiento del sector urbano), 13 % (417) es usado por el sector pecuario y el restante 1.44 % (46) por el sector industrial.

Cuadro 4. Pozos en explotación por tipo de uso en la Comarca Lagunera, 2003 (Fuente: SAGARPA-CEIEGDRS, 1990-2004)

Estado	*Tipo de uso*				
	Agrícola	*Pecuario*	*Industrial*	*Múltiple*	*Total*
Durango	*1,085*	*368*	*24*	*432*	*1,909*
Coahuila	*1,074*	*49*	*22*	*152*	*1,297*
C. Lagunera	*2,159*	*417*	*46*	*584*	*3,206*

Se puede observar que el principal uso del agua es para el sector agropecuario. Con respecto al uso público urbano cabe señalar que durante el período 2000 – 2003, la población de la Comarca Lagunera mantuvo un crecimiento medio anual de 1.6 %; once de los quince municipios que conforman la región registraron una tasa de crecimiento negativa y cuatro municipios una positiva (Lerdo 3.4 %, Gómez Palacio 3.2 %, San Pedro 0.1% y Torreón 2.3 %), éstos concentran 82.4 % de la población regional. Lo anterior ha repercutido en el consumo de agua en la región, que se incremento en 8.1 millones de m^3 durante el 2003, con respecto al consumo registrado en el año 2000, lo que equivale a un crecimiento medio anua de 3.7%. El consumo per cápita en promedio en la Laguna es de 279 litros de agua por día (SIMAS-SIDEPA, 1999). En relación al uso del agua en el sector industrial, la Laguna cuenta con 15 parques industriales que engloban a poco más de 871 empresas, que demandan una gran cantidad de agua (DGDET, 1999).
Si se mantienen constantes las tasas de crecimiento medias anuales registradas durante el periodo 2000-2003, se estima que para el año 2010 la población total de la Comarca Lagunera oscilará en 1.45 millones de habitantes, y el consumo de agua se incrementará en 25.8 %, es decir, el sector residencial consumirá cerca de 99.299 millones de m^3 (García y Guzmán, 2007). De manera particular en la Figura 5, se presentan los consumos de agua de 1997 a 2005, en la ciudad de Torreón, Coahuila.

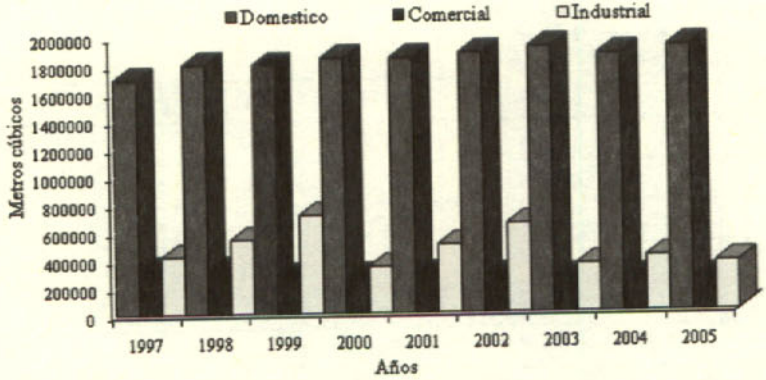


Figura 5. Consumos de agua por tipo de usuario de la ciudad de Torreón.

Sector agrícola

En relación al consumo de agua del sector agrícola (Cuadro 5), se estima que la demanda de agua para el año de 2010, para el sistema de riego por bombeo se verá incrementada en 15,846 ha, es decir, la superficie ascenderá a 92,841 ha y, en riego por gravedad, se reducirá en 21,056 ha. La superficie sembrada bajo riego por bombeo incrementaría el uso de agua en 89.6 millones de m^3, para ubicarse en los 990.6 millones de m^3. La superficie sembrada bajo riego por gravedad se reduciría en 200.3 millones de m^3 para ubicarse en 506.3 millones de m^3 aproximadamente (García y Salazar, 2007).

Cuadro 5. Consumo de agua por el sector agrícola de la Comarca Lagunera.

Cultivo	1995		2000		2006	
	Bombeo	Gravedad	Bombeo	Gravedad	Bombeo	Gravedad
Superficie sembrada (has), principales cultivos.						
Avena forrajera	2 519	776	4 933	350	12 268	523
Sorgo forrajero	1 262	1 485	6 012	4 846	4 146	5 918
Maíz forrajero	3 450	1 791	8 066	7 067	16 085	12 144
Melón	3 947	1 793	3 193	1 184	3 905	753
Alfalfa	23 348	5 798	31 906	4 924	33 611	5 648
Nogal	3 058	1 327	4 500	2 290	3 652	2 748
Maíz grano	6 592	16 064	1 005	5 250	425	2 151
Frijol	261	16 873	194	2 470	38	526
Subtotal	44 437	45 907	59 809	28 381	74 130	30 411
Región Lagunera	62 306	70 634	70 587	45 652	81 974	50 326
Consumo de agua (Mm^3)						
Avena forrajera	32.72181	10.87176	64.07967	4.9035	159.36132	7.32723
Sorgo forrajero	16.64578	28.37835	79.29828	92.60706	54.68574	113.09298
Maíz forrajero	38.1225	28.656	89.1293	113.072	177.73925	194.304
Melón	25.18186	16.56732	20.37134	10.94016	24.9139	6.95772
Alfalfa	634.83212	228.32524	867.52414	193.90712	913.88309	222.41824
Nogal	62.41378	39.22612	91.845	67.6924	74.53732	81.23088
Maíz grano	65.72224	231.96416	10.01985	75.81	4.23725	31.06044
Frijol	1.96272	183.9157	1.45888	26.923	0.28576	5.7334
Subtotal	844.881	757.03289	1159.6468	580.95174	1250.2823	654.79766
Región Lagunera	1722.4838	1524.9375	2383.3733	1166.807	2659.9259	1316.9226

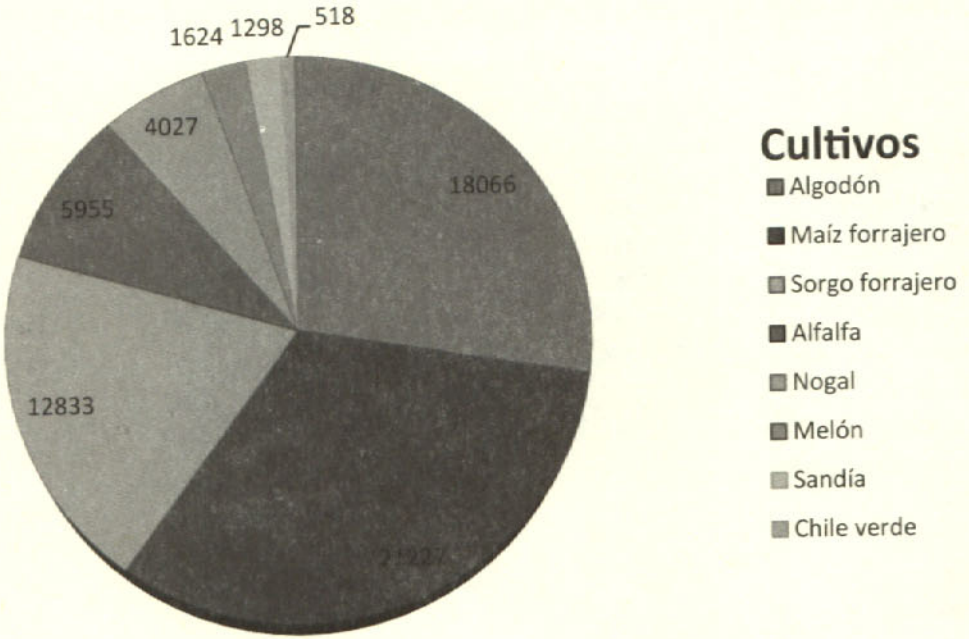


Figura 6. Principales cultivos establecidos en el DR 017 en el año agrícola 2006/7

Respecto a la competitividad medida de manera simple en base a la rentabilidad de los cultivos en el Cuadro 6, se observa que esta es mayor en los cultivos de tomate, nogal y sandía (Figura 6). En relación a la eficiencia en el uso del agua una eficiencia de uso mayor en los cultivos hortícolas; por ejemplo, para tomate fue de 16.43, lo cual indica que por cada metro cúbico de agua se obtienen 16.43 pesos. Respecto a los cultivos forrajeros, el maíz es el mejor forraje en cuanto a su rentabilidad y eficiencia, muy por encima de la alfalfa y el sorgo forrajero.

Los anteriores resultados permiten identificar un buen número de efectos no deseados o perjudiciales para el sector agrícola. Se ha detectado que muchos de los módulos de riego trafican con sus derechos sobre el agua (Cuadros 7 y 8).

Además, en ausencia de elementos institucionales que otorguen protección y seguridad jurídica para los pequeños titulares de los derechos y con mecanismos deficientes de regulación antimonopolio, el poder de mercado del gran comprador privado impone condiciones de intercambio poco equitativas para los arrendadores. En muchos casos existen conflictos, la indefensión legal *de facto*, aunque no *de iure*, está motivada por su incapacidad para iniciar acciones legales contra acuerdos alcanzados por el comprador de agua, que puede protegerse a través de sus propios servicios jurídicos (Bauer, 1997a; Howe, 1998; Colby, 1996).

Cuadro 6. Análisis de rentabilidad de los principales cultivos de la Laguna (2006).

Cultivos	*Rendimiento (ton/ha)*	*Costo de producción ($/ha)*	*Ingresos ($/ ha)*	*Tasa de rentabilidad*	**Eficiencia en el uso de agua ($/ m3)*
Alfalfa verde	*80.5*	*11,322*	*20,125*	*1.78*	*1.17*
Avena forrajera	*42.0*	*7,005*	*9,450*	*1.34*	*1.35*
Maíz forrajero	*45.0*	*9,983*	*14,850*	*1.48*	*2.13*
Sorgo forrajero	*55.0*	*9,310*	*17,050*	*1.83*	*1.78*
Zacate ballico	*43.5*	*7,276*	*10,005*	*1.37*	*1.42*
Melón	*22.0*	*18,771*	*31,900*	*1.69*	*7.93*
Sandía	*25.0*	*14,642*	*30,520*	*2.08*	*7.60*
Tomate	*28.0*	*21,678*	*75,600*	*3.48*	*16.43*
Chile jalapeño	*20.0*	*34,414*	*40,000*	*1.16*	*6.82*
Algodón	*5.4*	*21,984*	*25,893*	*1.17*	*3.89*
Sorgo escobero	*6.8*	*7,416*	*13,430*	*1.81*	*2.61*
Nogal	*1.7*	*21,294*	*56,100*	*2.63*	*4.36*
Maíz grano	*7.3*	*9,438*	*8,030*	*0.85*	*1.27*

Nota: Los costos de producción fueron del ciclo otoño-invierno 2005 y primavera-verano 2006.
*La eficiencia en el uso del agua fue calculada en base al Ingreso obtenido dividido entre la demanda de agua de cada cultivo.

Cuadro 7. Mercado de agua en el DR 017 (Varios años).

Disponibilidad de agua	1998	1999	2000	2001	2007
Volumen autorizado Mm^3	830	440	760	609	945
Superficie establecida (ha)	49 372	21 090	40 558	32 190	66 599
Renta de derechos ($/ha)	1 500	1 400	1 600	2 000	4 000
Renta de la tierra ($/ha)	250	350	400	450	700
Derechos rentados	69%	70%	65%	75%	60%
Principales cultivos	Algodón	Forrajes Algodón Alfalfa	Forrajes Algodón Alfalfa	Forrajes Algodón Nogal	Forrajes Algodón Nogal

La Cuenca donde se ubica el DR 017, se encuentra sobreexplotada, por lo que la garantía de suministro se ha visto reducida; además, hay problemas de salinidad que se han visto agravados. El mercado de agua puede inducir en los agricultores asignaciones de superficie en discordancia con las restricciones que imponen algunas políticas agrícolas en el país.

Cuadro 8. Precios del agua por sector.

Sector	*Precios actuales*	*Precios de escasez (mercado)**
Bombeo	*$0.582 m³*	*10% +*
Gravedad	*$0.05 m³*	*60% +*
Urbano	*$3.50 m³*	*$12.00 m³*
Industrial	*$10 – 15.00 m³*	*$15.00 m³*

*Estimado a partir de modelos econométrico

Conclusiones

Los resultados muestran que la operación del mercado de agua en la región no ha modificado la estructura productiva agrícola ya que en los últimos 14 años los cultivos forrajeros son los que ocupan los mayores volúmenes de agua, sin embargo, los beneficios económicos y de eficiencia están entre los más bajos. El mercado de agua sigue propiciando múltiples vías a la reconcentración del recurso, lo que refleja la carencia de una estructura de mercado como tal; motivando el acaparamiento y especulación de su valor económico.

Literatura citada

Ahlers, R., Rymshaw, E. y Kloezen, W.,1998. *Policy and Practise: Challenging Conventional Thought on Water Trading.* International Water Management Institute. August. México.

Bauer, J. C.1997a. *Bringing Water down to earth: The political economy of water rights in Chile, 1976-95.* University of California, Berkeley, U.S.A. World Development, Vol.25. No.5.pp.639-659.

Batista, M. J.1996. Respondiendo a la escasez de agua de riego: cambio institucional y mercadeo de agua. Estudio de un caso en las Islas Canarias. Revista española de economía agraria 175. pp.167-198.

Bravo, P. H.M. y Ortiz, R. G.A. 2000. *Características y beneficios económicos de los mercados de agua en distritos y unidades de riego.* X Congreso Nacional de Irrigación. Chihuahua, Chih. México,16-18 de Agosto de 2000.

Bowen, R. L. and Young, R.A. 1986. Appraising alternatives for allocating and cost recovery for irrigation water in Egypt. Agricultura Economics 1:35-52.

Calva, T.J.L.1998. *La economía nacional y la agricultura en México.* Editorial UACH. Chapingo, México.

CEPAL.1995. *Mercados de derechos de agua: Entorno legal.*División de Recursos Naturales y Energía. LC/R.1485. Enero. Ver. Español.

Colby, B.G.1996. Markets as a response to water scarcity: Policy challenges and economics implications, In. advances in the economics of environmental resources, Vol. 1. Marginal cost rate design and wholesale water markets, edited by D.C. Hall. JAI Press, Greenwich, Connecticut, 211-224.

CNA (Comisión Nacional del Agua). 1995. Lineamientos estratégicos para el desarrollo hidráulico. México, D.F.

CNA (Comisión Nacional del Agua). 1999. *Problemática en la región administrativa Cuencas Centrales del Norte.* Gerencia en la Región Lagunera. Subgerencia Técnica. Torreón Coahuila

CNA (Comisión Nacional del Agua). 2008. Estadísticas del Agua en México 2008. Ed. SEMARNAT. 1ª. Edición. México D.F. 75p

CNA (Comisión Nacional del Agua). 2008. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año agrícola 2006-2007. Ed. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. p. 41

CNA (Comisión Nacional del Agua). 2009. Acerca del Banco de agua. Semarnat. México, D.F. [citado 04 Agosto 2009]. Disponible en la World Wide Web: http://www.conagua.gob.mx/bancodeaguaoclsp/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=4a4af366-c2e6-4eb2-b2bd-83c6f345dfe7|Acerca del Banco del Agua|1|0|0|0|0.

DGDET (Dirección General de Desarrollo Económico de Torreón). 1999. *Estadísticas de las actividades productivas en la Comarca Lagunera.* Torreón, Coahuila.

Donoso, G., Andrei Jouravlev, Humberto Peña y Eduardo Zegarra. 2004. Mercados (de derechos) de agua: experiencias y propuestas en América Latina del Sur. CEPAL. Santiago de Chile.

FIRA. 1998. Boletín informativo. *Mercados de agua en México.* México, D.F.

Fisher, A.Fullerton, D., Hatch, N. y Reinelt, P. 1997. Alternatives for managing drought: A comparative cost analysis. Journal of Environmental Economics and Management 29, pp.304-320.

Fortis, H.M. y Rhodante Ahlers. 1999. Naturaleza y extension del Mercado de agua en el DR 017 de la Comarca Lagunera, México. IWMI, Serie Latinoamericana No. 10. 63 p.

Fortis, H.M., Rhodante Ahlers, Juan A. Leos R., y Enrique Salazar S. 2002. El Mercado de los derechos de agua en la Comarca Lagunera. Rev. Políticas Agrícolas. Año 12: 103-122.

García E. 1981. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.* Editorial Larios. México

Guajardo Flores, G., Albino del Río, A, y Hernández Valtierra, F.J.1997. *"Los derechos de agua en el sector rural de México"*, Subdirección Técnica FIRA, México, D.F.

García Salazar, J. A. y E. Guzmán Soria. 2007. *Demanda y Distribución de agua en la Comarca Lagunera*. Ed. Colegio de Postgraduados (CP). Montecillos Edo. de México.

Howitt, R.E.1998. Spot prices, options prices and water markets: An analysis of emerging markets in California. En Markets for water – potential and performance. Eds. K.W. Easter, M. Rosegrant, y A. Dinar), Kluwer academic publishers, Nueva York.

Howe, C.W.1998. Water markets in Colorado: Past performance and needed changes. En markets for water- potential and performance. Eds. K.W. Easter, M. Rosegrant, y A. Dinar), Kluwer academic publishers, New York.

Ley Agraria. 1992. Ley agraria de los Estados Unidos Mexicanos. Editorial Mc Graw-Hill. Méx.

Maestu, J. 1997. Dificultades y oportunidades de una gestión razonable del agua en España: la flexibilización del régimen concesional. En la economía del agua en España. Ed. J.M. Naredo. Fundación Argentina, Visor, Madrid.

Miller, K.A. 1996. Water banking to manage supply variability. En advances in the economics of environmental resources, Vol. 1. Marginal cost rate design and wholesale water markets. Ed. D.C. Hall.

Olmstead, J. Sunding,D. Parker, D. Howwit,R. y Zilberman, D. 1997.Water marketing in the 90's. Entering the electronic age. Choices third quarter, 15-19.

Panayotou, T. 1987. Economics, environment and development. Development discussion paper Nº.259, Cambridge, Mass.. Harvard Institution for International Development.

Ponce, H.1992.Explotación y gestión de aguas subterráneas en las comarcas del interior alicantino. Revista de estudios agro-sociales Nº. 159, pp.148-178.

Pérez, D.J., J. Mezo, y B. Álvarez, M. 1996. Política y economía del agua en España. Ed. Círculo de empresarios. Madrid, España. P.54, 136.

Perry, C; Rock, M, y Seckler, D.1997. *Water as an economic good: A solution or a problem?*. Research Report 14. International Irrigation Management Institute, Colombo.

Rinaudo, J.D., Strosser, P. and Rieu. 1997. Linking water Market functioning, access to water resources and farm production strategies: Example from Pakistan. Irrigation and Drainage Systems 11:262-280

Saleth, .M. 1996. Water institutions in India: Economics, Law, and Policy. Commonwealth publishers,

New Delhi.

SAGARPA-CEIEGDRS (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Comités Estatales de Información Estadística y Geográfica para el Desarrollo Rural Sustentable). 1990-2004. *Anuario Estadístico de la Producción Agropecuaria de la Región Lagunera Durango-Coahuila. Delegación en la Región Lagunera Durango-Coahuila*, Subdelegación de Planeación y Desarrollo Social. Lerdo, Durango. México.

SIMAS-SIDEAPA (Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento-Sistema Descentralizado de Agua Potable y Alcantarillado). 1999. *Estadísticas de Agua y Drenaje en la Laguna.* Torreón, Coahuila.

Schmidt, Gerold. 2005. Cambios legales e institucionales hacia la privatización del agua en México. Brot Fürdie Welt. Marzo 2005. MenschenRecht. WASSER.

WWF/Adena. 2005. Los mercados de aguas y la conservación del medio ambiente: oportunidades y retos para su implantación en España. Madrid, España.

CAPITULO 11

Cambio climático y conflictos sociales: geopolítica, hidro-diplomacia y guerra por el agua

Úrsula Oswald Spring

Universidad Nacional Autónoma de México
Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias

United Nations University: Institute for Environmental and Human Security

Índice

Resumen
Abstract
Introducción
Cambio climático, cuencas, acuíferos y agua virtual
Desertificación, degradación de suelos y sequías (DLDD)
Modelo PEISOR con sus interrelaciones complejas
Impactos sobresalientes del cambio climático en México: Interrelación naturaleza-sociedad
Securitizar la tierra y aterrizar la seguridad
Calentamiento global, desertificación y estrés ambiental producen riesgos, peligros, migración y conflictos que afectan a personas y comunidades
Hidro-diplomacia para resolver los conflictos
Algunas reflexiones conclusivas
Literatura citada

Resumen

El cambio climático (CC) ha generado múltiples y nuevos riesgos. La compleja interrelación entre naturaleza y actividades humanas obliga a desarrollar un concepto de seguridad del agua, que rebasa el control militar y crea una seguridad ambiental, societal, humana, de género y económica. Mediante una gobernanza participativa, conciliación de conflictos y organización socio-productiva es posible ordenar territorial y ambientalmente una región para manejar sustentablemente los recursos naturales, sin por ello deteriorar la calidad de vida de los participantes, ni afectar el patrimonio y el potencial natural. Tecnologías nuevas permiten optimizar el uso de agua y los medios de comunicación pueden estimular una cultura de agua. Mapas de riesgos y entrenamiento entre la población salvan vidas y reducen pérdidas por eventos hidro-meteorológicos extremos, a la vez que generan resiliencia entre la población para vivir en condiciones naturales crecientemente más adversas. La educación preventiva y la alerta temprana permiten reducir efectos del cambio climático, sin destruir los tejidos sociales existentes, ni depauperar a los más vulnerables o generar conflictos. Además, reducen los peligros de tener que migrar por falta de alimentos o guerra. En síntesis, el capítulo propone un desarrollo hidro-diplomático que capacita en una cultura del agua, donde se aprende a compartir y ahorrar agua, capturar lluvias y sanear aguas residuales para reciclarlas.

Abstract

Climate change is instrumental for multiple new risks. The complex linkage between nature and human activities requires a concept of water security that widens the focus of security from the military to the environmental, societal, human, gender and economic dimensions. Through participative governance, conciliation of conflicts and socio-economic organization it is possible to change a region in environmental and territorial terms towards a sustainable management of natural resources without a deterioration of the quality of life of the people. New technologies allow optimizing the use of water, and the mass media could reinforce the culture of water. Maps of risks and training of the people can save people's life and reduce losses from extreme hydro-meteorological events. This creates resilience to live under conditions that are becoming increasingly challenging. Preventive education and early warning reduces the effects of climate change without destroying social ties, increasing poverty among the vulnerable or creating conflicts. These activities reduce also the risks of forced migration due to a lack of food or war. In synthesis, this chapter proposes a hydro-diplomatic approach, which creates a new culture of water, where people learn to share, harvest and save water and recycle sewage water in agriculture and other productive activities.

Introducción

El presente trabajo analiza la interrelación entre cambio climático (CC) y conflictos sociales que han aumentado a raíz de los múltiples efectos que ha resentido México por este fenómeno global. Después de una breve descripción acerca de los efectos más sobresalientes del CC y el impacto en agua y agricultura, se analizan las posibles salidas que enfrentan los diferentes grupos sociales. Se centra el trabajo en las zonas áridas y semiáridas en particular, en los procesos de desertificación, degradación de suelos y sequías (DLDD; Rosenfeld *et al.*, 2001; CNULD, 2002). Ante un recurso hídrico crecientemente más escaso y con mayor contaminación, una precipitación regional y temporalmente concentrada, el gobierno mexicano y sus ciudadanos se enfrentan a conflictos sociales que requieren de modelos distintos para evitar salidas violentas. Por lo mismo, se propone primero el concepto de securitización, donde ante emergencias que afectan la supervivencia de amplios grupos sociales, se proponen medidas igualmente extraordinarios para conciliar los conflictos por la vía pacífica. Este acercamiento a una hidro-diplomacia efectiva distingue entre los tres niveles de gobierno y propone organizar a la sociedad para encontrar soluciones socio-tecnológicas factibles, procesos de capacitación para gestar una cultura de agua integral y mecanismos de resolución de conflictos que abarcan desde las tensiones geopolíticas entre los Estados Unidos (EUA) y México hasta los conflictos locales al interior de una comunidad.

Cambio climático, cuencas, acuíferos y agua virtual

El cambio climático en México se agrava por el cambio ambiental global (CAG). Ello ha generado una compleja interrelación entre factores naturales (agua, aire, suelo y biota) y actividades humanas, que se relacionan con la urbanización, la transformación del mundo rural y su producción agropecuaria, la dinámica poblacional y los procesos socio-productivos, financieros y de servicios (Figura 1) ha generado graves desequilibrios en la esfera socio-política, pero también en lo ambiental, al ofrecer nuevas oportunidades de desarrollo a grupos sociales cada vez más pequeños (una selecta elite) a la vez que ha truncado el futuro de las mayorías, sobre todo de jóvenes y ancianos. Esta discriminación estructural (IFRC-RCS, 2007, Oswald, en prensa) ha generado nuevos peligros y preocupaciones entre la mayoría de la población mexicana y ha orillado a grupos crecientes hacia una precaria supervivencia.

El proceso de desigualdad se refleja en el mundo por una globalización regresiva (Brauch *et al.*, 2008; Held y McGrew, 2007; Held *et al.*, 1999; Oswald, 2008a) que tiene repercusiones en la naturaleza y con efectos severos en lo social. A pesar de que los países industrializados emiten la mayor parte de los gases de efecto invernadero (GEI) y han agudizado el cambio climático, son sobre todo los países del sur (entre ellos México) quienes han sufrido las consecuencias tanto por desastres hidro-meteorológicos más fuertes y frecuentes (Magaña, *et al.*, 2004; Magaña 1999), como por un proceso de depauperación, que se refleja en hambre y miseria (CENAPRED, 2008; Oswald y Brauch, 2009; FAO, 2009;

Ziegler y Kalbermatten, 2008). Particularmente, la crisis en los precios de los alimentos a partir de 2007 ha mostrado que además de las condiciones físicas, es primordialmente la especulación con los precios que ha aumentado la pobreza en México tres millones de nuevos pobres de los cuales dos millones cayeron adicionalmente en pobreza alimentaria (INEGI, 2008).

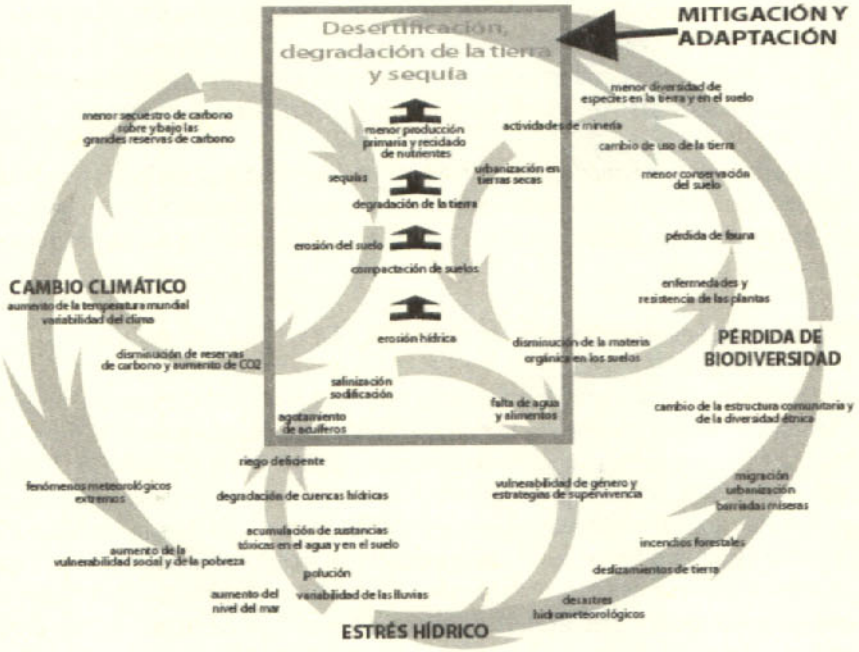


Figura 1. Cuarteto ambiental con repercusiones sociales (Fuente: Oswald y Brauch, 2009a)

En cuanto a los efectos físicos del cambio climático, México cuenta con 11,000 km de litorales en ambos océanos y el aumento del nivel del mar se estima entre 18 y 59 cm, aunque los datos más recientes indican que pudiera rebasar el metro a fines del siglo. Como efectos ya resentidos hay incrementos de calor, frío y de sequía, lo que ha generado mayores plagas y enfermedades, así como un deterioro de ecosistemas altamente frágiles con erosión y pérdidas de fertilidad natural de suelos (DLDD). En 2008 no sólo en el sureste, sino también en Morelos el dengue aumentó 600% y hay una expansión geográfica del paludismo hacia el norte. La reciente influenza AH1N1 muestra nuevos peligros a la salud humana y animal que rebasan nuestro país y fueron declarados por la Organización Mundial de Salud (OMS) como primera pandemia del siglo XXI.

Durante los últimos 25 años los daños directos por 75 eventos extremos ascendían a 9,600 millones de dólares (500 millones anuales) y causaron 10 mil muertos y millones de damnificados. A partir del año 2000, el número de ciclones se ha triplicado (5.6 por año comparado con 1.8 por año durante las tres décadas anteriores) y los daños entre 2005-2008 fueron mayores que los 25 años anteriores. En la última década, más de 90% de los desastres fueron de orden hidro-meteorológico y en 2005 los tres huracanes más desastrosos (Stan, Wilma y Emily) costaron 21,620 millones de dólares americanos. La inundación de Tabasco afectó en 2007 a 1.2 millones de personas (60% de la población) y causó daños por 9000 millones de dólares americanos, datos que casi se repitieron en 2008 con otra inundación similar (CENAPRED, 2008). La agricultura de temporal es severamente afectada por el CC, y 25 millones de campesinos dependen en su sostén de condiciones naturales cada vez más precarias.

En las costas el aumento del mar (pero también el mal manejo de los acuíferos y su sobreexplotación) ha facilitado la intrusión de agua salda al manto freático, reduciendo no sólo la superficie de riego agrícola, sino afectando también a la población en relación al abasto de agua potable (Rangel *et al.*, en prensa).

Desertificación, degradación de suelos y sequías (DLDD)

El impacto del CC perturba particularmente las tierras secas que representan 58% de la superficie del país y especialmente las tierras semiáridas, áridas e hiperáridas (desiertos) que se encuentran en un proceso agudo de deterioro (SEMARNAT-INE, 2006, SEMARNAT-CONAFOR-INE, 2007). Sequías prolongadas y de mayor severidad, precipitaciones erráticas y más localizadas, pero también más abundantes en el corto tiempo han aumentado la erosión hídrica, mientras que la falta de lluvia ha agudizado la erosión eólica. Estos cambios climáticos afectaron la cubierta vegetal natural y han facilitado el surgimiento de nuevas plagas y enfermedades en plantas y animales. Ante condiciones climáticas adversas, los productores agropecuarios han utilizado el riego para compensar la irregularidad de las lluvias. No obstante, un mal manejo del riego, una baja eficiencia y la sobreexplotación de los acuíferos han obligado a perforar pozos a mayores profundidades. La calidad del agua se ha deteriorado y ahora contiene mayores sales disueltas con la consiguiente salinización de los suelos agrícolas, lo que se agrava en la costas como la de Hermosillo, donde el agua del mar se introdujo en los acuíferos por la sobreexplotación (Rangel *et al.*, en prensa).

Estos procesos han deteriorado particularmente los suelos de temporal, donde viven los campesinos de subsistencia, que dependen de la precipitación y que representan 78% de los productores rurales y 80% de los pobres del país. Sus condiciones socioeconómicas eran antes de alta marginalidad, pero por los efectos del CC se ven frecuentemente obligados a abandonar sus tierras al perder las condiciones mínimas de supervivencia. Los mapas de las figuras 2 y 3 muestran que la mayor migración se da en las regiones áridas y semiáridas erosionadas y salinizadas del país y no en las de mayor marginalidad (Figura 4) del sureste.

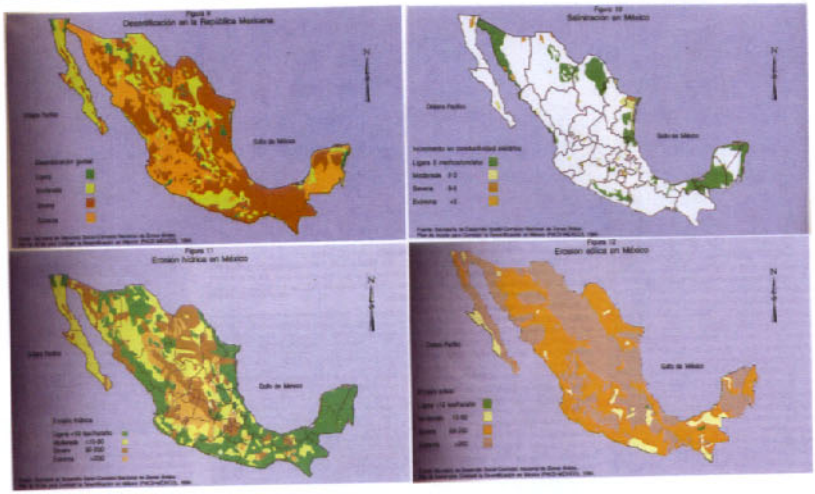


Figura 2. Causas del deterioro de suelos en México (Fuente: SEMARNAT, INE, 2006)

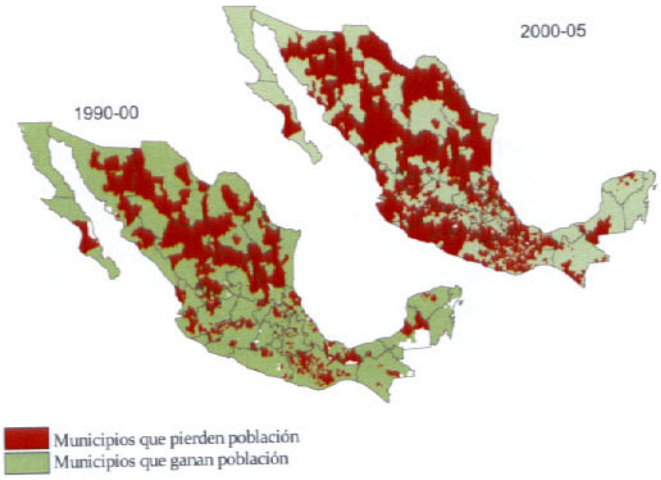


Figura 3. Dinámica Interna de Población por Municipios en México (Fuente: INEGI, Censo de Población 2000 y Conteo de Población 1995, 2005)

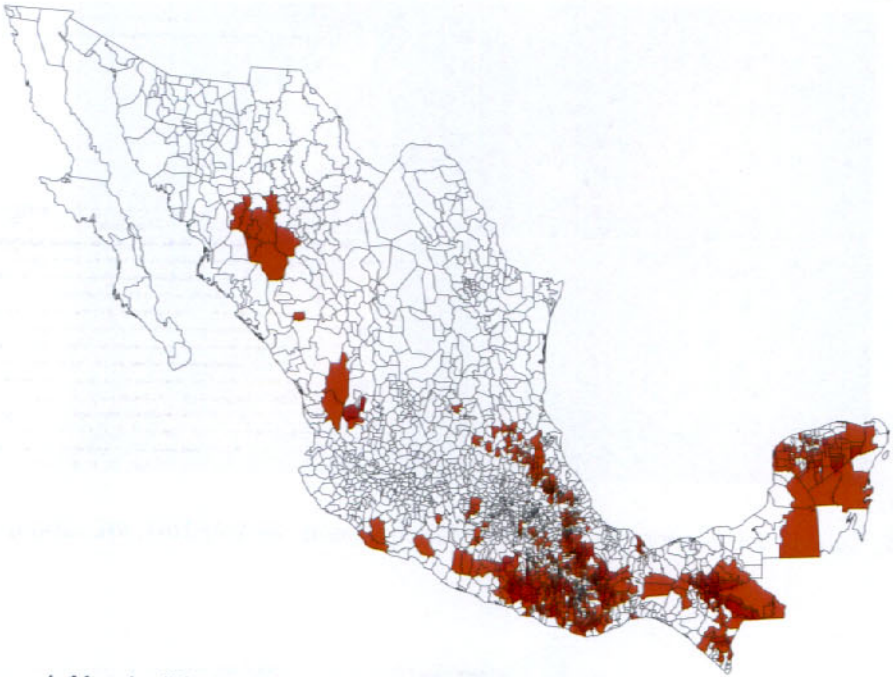


Figura 4. Marginalidad en México (Fuente: Chávez, *et al.*, 2006)

El proceso de desertificación, degradación y sequía (DLDD) acompañado por una pérdida de fertilidad natural y erosión del suelo es severo en México. De acuerdo a SEMARNAT-INE (2006) 93 millones de hectáreas o 47% del territorio nacional muestran procesos de desertificación. Según Riod.MEx (2008) este proceso ha afectado dos años más tarde a 120 millones de hectáreas, de las cuales 93% son resultado de un mal manejo del suelo. Las mayores causas son pérdida de fertilidad (18%); erosión hídrica (12%), erosión eólica (11%) y salinización (8%; ver figura 2).

Los datos de simulación arrojan que por el CC se pudieran perder en 2050 entre 13 a 27% de la superficie de tierras destinadas al cultivo del maíz (Figura 5). Si a este dato se añade el uso en los Estados Unidos del maíz para la producción de etanol y el incremento del precio internacional de este producto básico por escasez, de producción de biocombustibles a partir de alimentos y especulación, la situación alimentaria de México (Esteva y Marielle, 2003) se torna no sólo precaria, sino peligrosa, ya que el mayor exportador de granos pudiera verse también afectado por el CC (Alcamo y Endejan, 2002), y por ende tendrá rendimientos menores. El conjunto de la situación alimentaria mundial se ha tornado altamente compleja por nuevos consumidores de granos en China e India, a la vez que una mayor DLDD en África y parte de India y China no sólo generarían mayor presión sobre los granos mundiales, sino aumentaría sustancialmente el precio, lo

que afectará mucho más a los más pobres quienes hoy día no cuentan con lo necesario para alimentarse. Sin duda, los mil millones de hambrientos en el mundo y más de 28 mil personas que mueren diariamente por causas asociadas al hambre, son preocupantes (FAO, 2009). Finalmente, mayores precios de granos inciden además en los costos de alimentación del ganado y sus derivados (lácteos, huevos, carne, pieles) particularmente, en las regiones áridas y semiáridas que viven de la ganadería extensiva. Para estos pastores no les queda muchas veces otra alternativa ante la falta de pastizales y agua para sus animales que invadir zonas agrícolas, donde se arriesgan a generar conflictos con los campesinos sedentarios cuando compiten por los recursos naturales escasos.

Otros buscan su sostén en las grandes ciudades o fuera del país (Cuadro 1). Todas estas relaciones se tornan altamente complejas y mediante el modelo PEISOR se trata de analizar las retroalimentaciones entre procesos naturales y humanos; ver las interrelaciones negativas y positivas y entender las posibles salidas socio-políticas, así como las medidas de mitigación y adaptación.

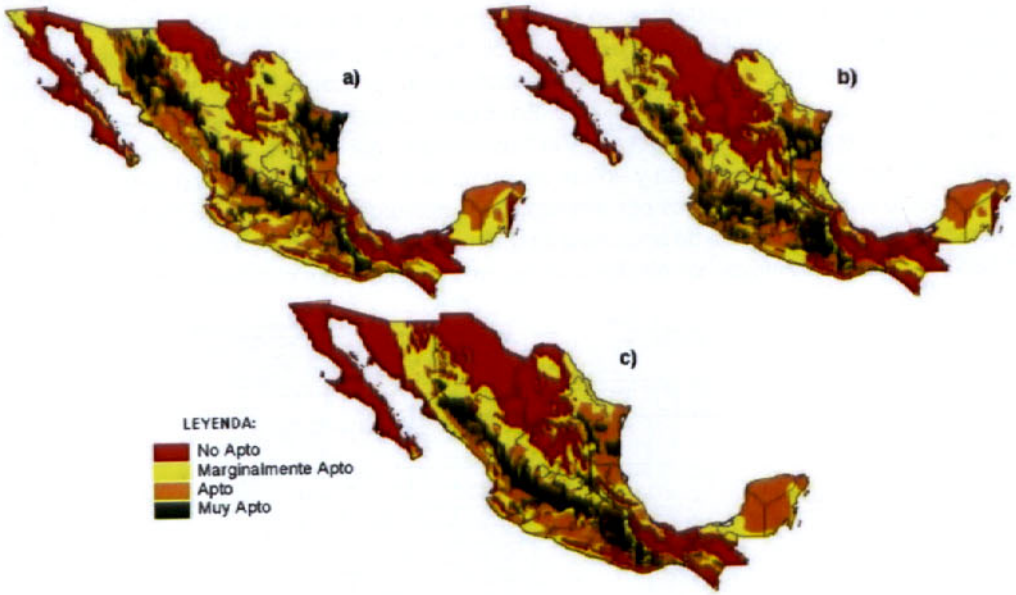


Figura 5. Escenarios de afectación y adaptación del maíz por el CC; (Fuente: Monterroso y Rosales, 2006)

Cuadro 1. Principales usos pecuarios en zonas secas del Norte de México (Fuente: SAGARPA, 2007)

Especie	*Producto*	*Razas*
Bovinos	*Leche*	*Holstein*
Bovinos	*Carne*	*Angus, Brangus, Hereford, Charolais, Limusin*
Caprinos	*Leche y carne*	*Alpina, Sanen, Togenbourg*
Ovinos	*Carne*	*Rambouillet, Corriedale, Pelibuey*
Porcinos	*Carne*	*Yorkshire, Hampshire, Duroc, Landrace*
Aves	*Carne y huevo*	*Leghorn*
Abejas	*Miel y cera*	*Europea*

Modelo PEISOR con sus interrelaciones complejas

El modelo PEISOR (Figura 6) es una síntesis de la presión (P), los efectos (E), los impactos (I), las consecuencias sociales (SO) y las respuestas (R) ante el cambio climático. El modelo analiza la *presión* que ejercen los seres humanos sobre los recursos naturales, agravada por el cambio climático antropogénicamente inducido, a raíz de la quema de los energéticos fósiles, la deforestación, el mal manejo de los suelos y del agua, así como la pérdida de la biodiversidad. El cuarteto ambiental (véase Figura 1): agua, aire, biodiversidad y suelo, puede afectar a todos los servicios ambientales, pero tiene E: *efectos* caóticos y poco predecibles, que generan complejas interrelaciones entre naturaleza y sociedad. En el caso bajo estudio destaca la escasez y contaminación del agua, el deterioro del aire y la biodiversidad, así como la afectación del suelo por sobre-fertilización, erosión hídrica y eólica, así como salinización por un mal manejo del riego. El I: *impacto* aumenta los riesgos por eventos hidro-meteorológicos extremos tanto por exceso (inundaciones) como por falta de agua (sequías), donde la tecnología y una política gubernamental acertada pudieran mitigar los efectos más nocivos causados por el cambio climático.

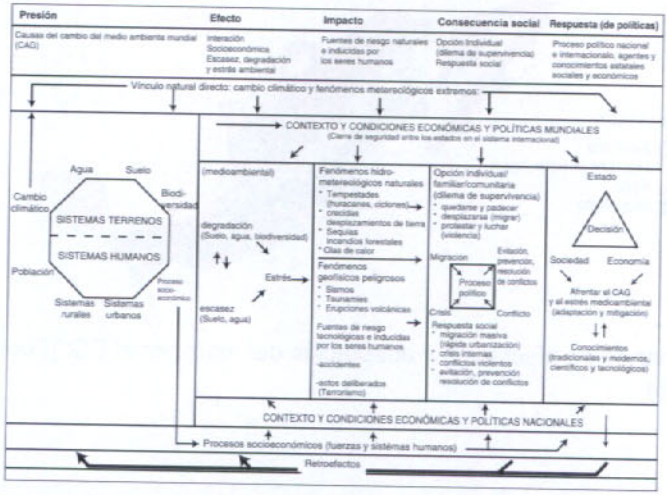


Figura 6. Modelo PEISOR (Fuente: Oswald y Brauch, 2009)

Las S: *consecuencias sociales* son diversas y abarcan desde respuestas familiares, comunitarias o regionales hasta migraciones masivas (Figura 3) y abandono de comunidades. Incluye las evacuaciones programadas por eventos hidro-meteorológicos extremos o las reubicaciones de poblaciones por procesos de modernización (presas, conjuntos turísticos, parques industriales). Una acertada política gubernamental es organizar a la sociedad para adaptarse a las condiciones adversas y generar resiliencia ante eventos extremos para que éstos no se conviertan en desastres que incluyen la pérdida de vidas humanas y daños materiales irrecuperables. No obstante, los procesos sociales son complejos y abarcan una gama amplia de comportamientos que van desde el reforzamiento de prácticas negativas con el encadenamiento de múltiples crisis (la ambiental, la climática, la alimentaria, la de seguridad pública y la de salud; véase la situación en México a partir de mayo de 2009) hasta el estallido de conflictos locales, donde las disputas por la tenencia de la tierra, por el acceso al agua y por el aprovechamiento de otros recursos naturales o discrepancias alrededor de apoyos gubernamentales lleven a algunos pueblos a expandir el conflicto hacia toda una región. Otra consecuencia es la migración temporal o definitiva, sea la rural-urbana, la urbana hacia zonas periféricas de una de las tres megalópolis: Zona Conurbada del Valle de México: (ZCVM), Guadalajara o Monterrey, o la migración internacional, donde están involucrados migrantes rurales y urbanos. Todos estos procesos implican destrucción del tejido social, nuevas amenazas y riesgos desconocidos (Beck, 2001) que obligan a comunidades enteras a adaptarse a condiciones desconocidas, donde se pueden presentar nuevos conflictos por la apropiación de tierras, viviendas, empleos, agua y alimentos.

Finalmente la R: *respuesta* gubernamental y social determina el alcance y la profundidad de la o las crisis. Se refiere a las políticas, donde los tres actores, definidos por Max Weber (Weber, 1987): el Estado, la sociedad organizada y los empresarios tienen que encontrar consensos para conciliar un proyecto común de país que permita mitigar y adaptarse a las condiciones crecientemente más adversas. El Estado debería cuidar a los altamente vulnerables, prevenir con acciones concertadas efectos aún más negativos, ubicar a los desplazados hacia lugares aptos, donde pueden rehacer su vida y ofrecerles sitios más seguros, donde existan además servicios públicos y posibilidades de trabajo. En estas tareas los conocimientos tradicionales se pudieran combinar con los avances científicos modernos y el aprendizaje mutuo permitiría generar procesos de resiliencia que puedan ayudar en situaciones nuevas a enfrentar las dificultades con menos conflictos sociales. No queda duda que la peor opción para cualquier gobierno es *no actuar* y los costos por esta pasividad pueden tornarse impagables en términos financieros, ambientales, de vidas humanas, estabilidad política y convivencia social (véase los cálculos del Informe Stern, 2006).

El modelo PEISOR hace también énfasis en los procesos de retroalimentación y en los efectos retroactivos negativos entre los fenómenos naturales y sociales. En cualquier fase del modelo existen factores externos e internos que pueden desestabilizar el con-

junto del sistema y por lo mismo, requieren de intervenciones acertadas y a tiempo para reducir la tensión y así evitar salidas extremas y catastróficas. Las acciones preventivas son siempre menos costosas que las reactivas. No obstante, la política gubernamental tiende a privilegiar lo reactivo en lugar de lo preventivo.

Impactos sobresalientes del cambio climático en México: Interrelación naturaleza-sociedad

El cuarteto ambiental (Figura 1) interrelaciona el ciclo del aire la circulación atmosférica y el cambio climático con el ciclo del agua, donde la escasez y la contaminación son los procesos sobresalientes. Cambios en la temperatura y escasez o agua contaminada afectan al ciclo de la biodiversidad, donde el uso de plantas y animales silvestres y criados constituyen la base de la alimentación humana y animal. El deterioro de la biodiversidad (CONABIO, 1998) no sólo priva a los seres humanos y la naturaleza de enormes bienes, sino que al igual que la falta de aire y agua torna inhabitable al planeta Tierra. Menos agua, temperaturas más extremas y aire más contaminado reducen además la flora y fauna natural. Una vez privado el suelo de su cubierta empieza a secarse y erosionarse por acción del viento y del agua, lo que deteriora la capa de fertilidad natural y su capacidad de regenerase para conservar su potencial productivo. A su vez suelos erosionados y sin vegetación reducen la capacidad de fijación de bióxido de carbono y por lo mismo, ya no mitigan las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera. La evapotranspiración se limita al igual que la humedad en la atmósfera, lo que reduce las precipitaciones y genera condiciones climáticas más secas aún, que se agudizan por el aumento de la temperatura. Todo ello impacta a la biodiversidad y los ecosistemas que se habían desarrollado durante tiempos largos y cuentan con poca capacidad de adaptación en el corto plazo. La mayoría de la flora y fauna se deteriora en condiciones naturales distintas y se pierde la habilidad de mitigar, pero también de nutrir a otros procesos naturales y humanos, gracias a los servicios ambientales.

Este ciclo natural trunco es negativamente reforzado por actividades antropogénicas que deterioran aún más los procesos naturales anteriormente descritos. Urbanización y procesos productivos contaminantes generan mayores emisiones de GEI, contaminan al agua y el suelo y deterioran la vegetación. La competencia por el uso del suelo induce a la deforestación y la sobre-explotación de las tierras. Suelos con pendientes pronunciadas, cuando se aplica riego sin terraceo, se erosionan muy rápidamente, con la consiguiente pérdida de fertilidad natural y la reducción de rendimientos. Pero también el riego por lámina aplicado en los distritos de riego en regiones áridas y semiáridas provoca mayor evaporación, agotamiento de acuíferos, salinización y degradación de tierras. Ante tierras deterioradas y rendimientos agrícolas decrecientes se da frecuentemente un cambio hacia el pastoreo extensivo, lo que presiona todavía más a los ecosistemas frágiles y los torna muy rápidamente infértil (Figura 2). Sin posibilidad de generar alimentos y empleos, la población de estas regiones se ve obligada a abandonar sus

comunidades (Figura 3) y buscar mejores condiciones de vida en las grandes ciudades, donde se asientan en tierras marginales, frecuentemente de alto riesgo. Otros intentan cruzar de manera ilegal hacia los EUA y ante los muros y la Patrulla Fronteriza escogen el camino más peligroso por el desierto de Arizona, donde frecuentemente el calor, la falta de agua, los animales salvajes y el desconocimiento de caminos los lleva a la muerte (PEW, 2009). Otros no encuentran otra opción que vincularse al crimen organizado, donde el tráfico de humanos, de armas, de contrabando y de drogas se combina con la prostitución y la violencia, en deterioro de la dignidad humana y su supervivencia.

Pero también el aumento en eventos hidro-meteorológicos extremos (huracanes, inundaciones, sequías), la erosión de costas y la salinización de acuíferos obligan a la población a abandonar sus hogares y comunidades, con el consiguiente peligro de enfrentarse en el nuevo lugar a la población nativa y luchar por el acceso a recursos escasos (agua, tierras, alimentos y trabajo). Así, el CC, el estrés hídrico, la pérdida de la biodiversidad y la DLDD refuerzan negativamente los procesos naturales generando nuevos riesgos y vulnerabilidades a la población y a los ecosistemas. Sólo un análisis integral entre aspectos naturales y sociales permite proponer alternativas viables que pudieran mitigar los efectos más sobresalientes del CC y evitar un deterioro socioeconómico mayor.

Pareciera que las acciones políticas de las últimas décadas no han entendido la gravedad del problema. Las decisiones políticas desarrollados en México se han orientado a beneficiar una pequeña elite. Este proceso se llevó a cabo a costa del conjunto de la sociedad con lo que se limitó consolidar el mercado interno y la capacidad adquisitiva de las mayorías. Se ha castigado el desarrollo del país y la construcción de un mercado interno para beneficiar al mercado exterior, como se refleja en la importación de granos básicos, a raíz de la firma del TLCAN a partir de 1993. Entre 1994 y 2004 la importación anual de granos aumentó de 0.47 a 16 millones de toneladas y el precio del grano básico se redujo abajo del costo de producción promedio (hasta 2008), gracias a los subsidios norteamericanos en 64%, mientras que al mismo tiempo el precio de la tortilla en manos de la agroempresa aumentó 270% (SAGARPA 2008; Arroyo y Villamar, 2002; Nadal y Wise, 2004). Desde los años setenta, el país ha sido afectado por reiterativas crisis socioeconómicas con graves repercusiones en el campo y el subimiento de ciudades perdidas. La falta de una educación adaptada a las condiciones del país y orientada a generar empleos dignamente remunerados (ILO, 1999), han agravado la desigualdad entre regiones y grupos sociales (Figura 4). En 2008, la falta de empleos para jóvenes empujó a medio millón de ellos a buscar ingresos en el narcotráfico (Congreso de la Unión, sesión mayo 2009), con lo que la violencia al interior de los pueblos y las ciudades ha aumentado. La OCDE en su revisión de junio 2009 estima una caída del PIB en este año de 8% e INEGI reporta de abril a junio de de este año una caída de 10.3%. La desocupación ronda en 5.7% de la PEA, lo que significa más de un millón de fuentes de trabajo pérdidas para acumular 2.4 millones de desempleados abiertos.

En síntesis, una combinación de factores climáticos y socioeconómicos (aumento en los

costos productivos, reducción en precios de granos básicos, negligencia gubernamental, falta de crédito, condiciones climáticas adversas e importación de maíz subsidiado (Oswald, 2009a) han orillado a importantes grupos sociales a abandonar sus comunidades, pero han generado también múltiples conflictos al interior y entre pueblos por la apropiación de los recursos crecientemente más escasos. Estos procesos se agudizan en las ciudades, donde una élite controla la mayor parte de las tierras de buena calidad que ha fraccionado, mientras que los más pobres se ven expulsados hacia las orillas de las megalópolis y sobreviven en condiciones precarias.

Securitizar la tierra y aterrizar la seguridad

Todo ser humano busca como máximo anhelo el bienestar y la seguridad. Arnold Wolfers (1962) (un realista) definió los dos lados del concepto de seguridad: "Seguridad en el sentido objetivo mide la ausencia de amenazas a los valores adquiridos; en el sentido subjetivo la ausencia de miedos que dichos valores pudieran destruirse". No obstante, esta definición ignora ¿cuáles valores están amenazados, quién representa estos valores; quién puede estar amenazado; cómo se ven en la realidad estas amenazas y cómo se puede distinguir entre miedos reales e inducidos (por ejemplo por los medios masivos de comunicación que subestiman la crisis económica presente y sobre-enfatizan la violencia por el narcotráfico)?

Por ello, la ausencia de "amenazas" es un interés principal de los políticos y militares, mientras que la ausencia de "miedos" fue desarrollado por científicos sociales y responde a las preocupaciones de la sociedad (Buzan *et al.*, 1998; Wæver, 2008). Ante esta divergencia el enfoque constructivista ha postulado que toda realidad es socialmente construida, y por eso la seguridad es intersubjetiva[10]. La Escuela de Copenhague de Seguridad amplia la seguridad militar y política (enfocado a la soberanía nacional gracias al ejército) hacia una seguridad societal, económica y ambiental (Wæver, 2008a; Brauch *et al.* 2008, 2009; Oswald y Brauch, 2009a). A partir de 1984, desde Pakistán (Mahbub ul Haq, 1996) e India (Sen, 1992; Sen, 1995) se propuso en la ONU el concepto de seguridad humana (UNDP, 1994; UNEP 2001; Rojas y Goucha, 2002; Fuentes y Rojas, 2005; Brauch, 2005). Posteriormente, se ahondó en la seguridad ambiental (Dalby et al. 2008) y después se desarrolló la seguridad de género (Oswald 2008b), dando un gran impulso al concepto profundizado y ampliado de seguridad (Oswald 2009a; Oswald 2009c). Simultáneamente, diferentes dependencias de Naciones Unidas, pero también gobiernos preocupados por sus ciudadanos empezaron a sectorizar la seguridad en seguridad alimentaria, energética, de salud, de agua y otras. Todos estos esfuerzos de seguritizar

10 La guerra contra Irak permitió a G.W. Bush su reelección al incrementar el miedo de la población por el ataque al Word Trade Center con sus intereses de expansión armamentista y la privatización de los cuerpos de seguridad. Una vez mostrado que engañó a la población, y que los peligros reales son también el CC que ha costado en el caso de Katrina en New Orleáns casi el mismo número de muertes y muchos mayores daños económicos, la población buscó una seguridad más amplia con la elección de presidente Obama.

(Oswald y Brauch 2008; Brauch *et al.*, 2008; Brauch *et al.*, 2009) en términos humanos, ambientales y de género a los procesos sociales abren el campo hacia nueva políticas y prácticas para mitigar el impacto del CC y generar entre las poblaciones mayormente afectadas modelos de adaptación y de resiliencia para enfrentar las amenazas nuevas, muchas de ellas hasta ahora desconocidas.

Calentamiento global, desertificación y estrés ambiental producen riesgos, peligros, migración y conflictos que afectan a personas y comunidades

Los procesos de desertificación, degradación de suelos (DLDD) y los largos periodos de sequía han generado migraciones amplias, pero también conflictos y hambrunas (Darfur, Etiopía, Corea del Norte; Alcamo y Endejan, 2002). Si consideramos que agua es agua virtual, se entiende la relación entre escasez de agua y falta de alimentos (Oki *et al.*, 2002). Pero también el aumento en los precios de los alimentos básicos a causa de la especulación y el uso del maíz y otros alimentos como biocombustibles a partir de 2007, ha colapsado las reservas mundiales y ha generado escasez en granos básicos en muchos países (Altieri, 1999; Oswald 2009b).

La figura 7 muestra las protestas y enfrentamientos por el aumento en los precios en los productos básicos en el mundo a partir de 2007, protestas que iniciaron en México con la crisis de la tortilla. Los datos del hambre hablan por sí solos. Más de mil millones de personas sufren hambre y lejos de reducir el número de hambrientos estas políticas comerciales desiguales y prácticas especulativas han incrementado en 100 millones el número de hambrientos y han alejado las metas de desarrollo del milenio.

Si se combina esta escasez de alimentos con la falta de transparencia en diversos gobiernos (Sudán, Etiopía, Corea del Norte), que tardíamente acudieron a la ayuda internacional u otros mecanismos de prevención, se pueden desatar hambrunas.
La población afectada se vio enfrentada a un "dilema de supervivencia" con las siguientes opciones algunas de ellas poco deseables, y difíciles para los grupos altamente vulnerables como mujeres, niños, ancianos, indígenas y pobres lo cual generó inestabilidad política:

Quedarse con hambre y morir
Emigrar y enfrentarse en otro lugar por agua, tierras, empleos y alimentos
Capacitarse y adquirir resiliencia social
Organizarse políticamente y luchar por condiciones dignas de vida y procesos de prevención mediante estrategias de supervivencia y micro-empresas y economía de solidaridad
Combinar apoyos internos con cooperación internacional, ciencia y tecnología, nichos de mercados y economía de solidaridad con apoyo nacional e internacional.

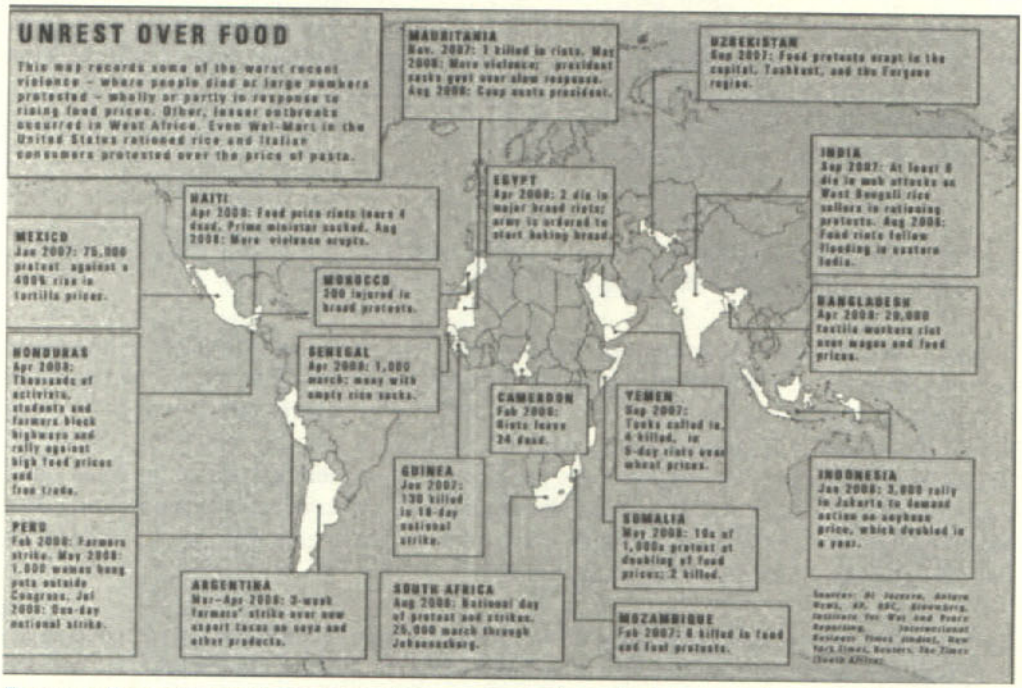


Figura 7. Protestas por hambre y altos precios en los alimentos en el mundo; (Fuente: IISS Strategic Comments, 2008)

El círculo vicioso de hambre, pobreza, mala o falta de educación y miseria se combinan frecuentemente con desnutrición y condiciones productivas en el campo en suelos marginales, altamente erosionados (con DLDD), condiciones climáticas crecientemente más adversas y desastres relacionados con el CC. En este caso se puede generar no sólo migración sino en muchos casos conflictos locales, que a veces se convierten en enfrentamientos regionales (Figura 8; OCDE, 2008; OCDE, 2009). Cada fenómeno en sí sólo es peligroso y destruye el tejido social, así como las condiciones de vida y de bienestar de comunidades enteras, pero combinadas pueden generar retroalimentaciones con efectos catastróficos para los grupos altamente vulnerables. Ello requiere de intervenciones decididas por parte del gobierno, de la sociedad y de los actores económicos para evitar consecuencias irreversibles que pudieran desembocan en inestabilidades regionales o en guerras civiles y conflictos armados entre países, como lo mostró el caso de Etiopia o Darfur. Ambos casos eran capaces de desestabilizar una región entera y generar cientos de miles de muertes, refugiados y millones de desplazados y después de intentos de conciliación por parte de la ONU y de los cuerpos regionales africanos, acompañados por inversiones cuantiosas, tienen dificultades para mantener la estabilidad en el continente y particularmente en la región del Cuerno de África y la República Democrática del Congo. En Centroamérica y México las condiciones de creciente marginalidad y pobreza no sólo han agudizado la migración hacia las megalópolis y capitales regionales, sino que han

obligado a grupos crecientes a emigrar hacia los EUA. Particularmente, el cruce de los centroamericanos por dos fronteras altamente violentas los ha expuesto a violaciones de sus derechos humanos, a secuestros, extorsión, violación y robo, sin que los afectados hayan podido denunciar a sus agresores por tratarse frecuentemente de autoridades mexicanas (véase el Informe de la Comisión Nacional de los Derechos Humanos CNDH, junio 2009) o miembros del crimen organizado. Asimismo, las complejas interrelaciones son difíciles de predecir, ya que en cada caso se desarrollan efectos indeseados y con dinámicas propias de cada región, donde las situaciones regionales particulares determinan el desenlace y el tamaño del sufrimiento humano.

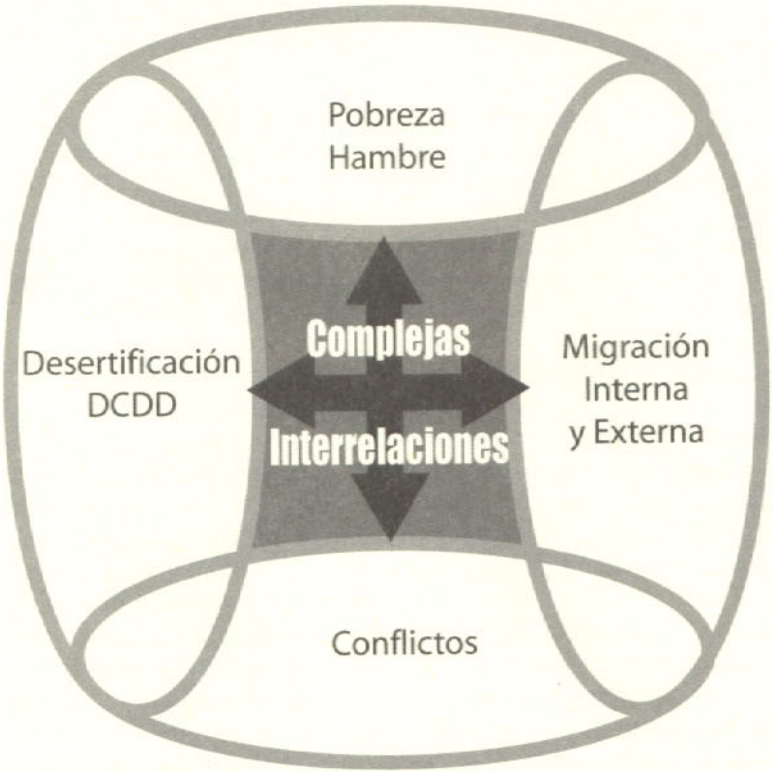


Figura 8. Interrelación socio-ambiental

Hidro-diplomacia para resolver los conflictos

Los conflictos por los altos precios en alimentos, agua y tierras en litigio (García, 2004) se han agravado por el impacto del CC y la disponibilidad de recursos naturales cada

vez más escasos y contaminados (Bächler et al., 2002). Asimismo, los estragos de la crisis socioeconómica en 2009 (la más severa en el mundo desde los años treinta y en el país todavía peor que la de 1994) ha sumido a más de la mitad de la población económicamente activa (PEA) en México al desempleo y al subempleo y a más de un tercio a trabajar en condiciones precarias de autoempleo o en microempresas sin ingresos seguros (ILO, 1999; ILO, 2009). Ante esta compleja situación, los conflictos por los recursos naturales y los hídricos en particular requieren de un modelo de gestión integral del recurso agua, que inicia en la cuenca alta. Se necesita ordenar rigurosamente la cuenca media en términos territoriales y ambientales, donde se presentan los procesos caóticos de urbanización y de agricultura de riego y acaparamiento de tierras, con el fin de ofrecer agua de calidad a los ciudadanos en esa región y también a la cuenca baja, donde se presentan los procesos agropecuarios más intensos, el turismo y las actividades de pesca.

A su tiempo, cuidar el agua significa entender la compleja interacción del cuarteto ambiental (Figura 6), con los procesos socioeconómicos, que requieren del vital líquido, pero que lo desperdician y lo contaminan. A su tiempo, 72% (1084 km^3) de la precipitación promedio de 711 mm/año, se evapora y el norte árido y semiárido recibe sólo 25% (en Baja California llueve en promedio 199mm/año y en Tabasco 2,588mm/año). Además, 67% de las lluvias mexicanas se concentran temporalmente entre junio y septiembre, con una severa escasez de enero a mayo.

Homer-Dixon y Blitt (1999) vinculan la violencia acerca del agua con el crecimiento poblacional y la visión de seguridad con la que se organiza un Estado determinado. Su grupo analizó sistemáticamente los conflictos ambientales en diferentes partes del mundo y llegó a la conclusión de que la escasez del agua genera condiciones de alta vulnerabilidad y por ende, puede desembocar en conflictos (Homer-Dixon, 1991; 1994; 1999; 2000). Un segundo estudio empírico dirigido por Bächler (*et al.*, 2002) llega a la conclusión de que los conflictos ambientales se relacionan no sólo con recursos escasos, sino también con recursos abundantes (por ejemplo petróleo y otros recursos estratégicos en Irak, Nigeria o la República Democrática del Congo). Ambos fenómenos pueden generar conflictos internos o entre países. UNESCO exploró diversos mecanismos de conciliación de conflictos ante existentes y futuros enfrentamientos por el agua, donde se promovió una cooperación entre los países de la cuenca del Nilo en un esfuerzo colectivo para resolver de manera consensual y preventivamente los problemas relacionados al uso del agua (UNESCO, 2005).

Oswald (2006) revisó algunos conflictos por el agua en México y encontró una estrecha correlación con los conflictos por la tierra, los cuales a raíz del cambio del Artículo 27 de la Constitución habían aumentado sustancialmente. Los conflictos hídricos cuentan por lo tanto con complejas interrelaciones que frecuentemente se refuerzan negativamente. Además, las controversias acerca del agua incluyen normalmente el uso de aguas subterráneas y muchos de ellos están regulados por concesiones a

particulares sin una adecuada medición. Dado que en México casi toda el agua destinada al consumo humano es extraída del subsuelo, ésta compite permanentemente con el uso agropecuario e industrial. Si bien 72% (1,084 km^3) de la lluvia se evapora y se integra al ciclo hídrico, existe competencia entre los tres sectores que pugnan por el uso del agua. El sector agropecuario se apropia de 78% del vital líquido e irriga 6.3 millones de hectáreas de cultivos. El sector industrial extrae 10% del subsuelo mediante permisos de concesión y el doméstico requiere de 13% (CNA, 2008). Ante intereses opuestos, agua superficial y subterránea sin planeación integral, creciente escasez y contaminación, la Comisión Nacional del Agua está encargada de dirimir los conflictos y administrar el agua desde la cuenca y el acuífero hasta la casa y el campo[11].

A fin de negociar pacíficamente los conflictos de agua se propone un modelo de hidro-diplomacia (Figura 9). Explora primero los orígenes del estrés hídrico (modelo PEISOR, Figura 6) y establece las relaciones causales entre factores que reducen la *oferta* del recurso (cuarteto ambiental): cambio climático, mal manejo de cuencas, desvío de ríos, contaminación de agua superficial y acuíferos por aguas negras, deforestación, erosión, incendios forestales, pérdida de biodiversidad, contaminación del aire, sequía, desertificación, pérdida de fertilidad del suelo (DLDD) y aquellos que aumentan la *demanda*: crecimiento poblacional, urbanización, industrialización, agricultura de riego, producción pecuaria, servicios, fugas y desperdicio del agua). Gran parte de México sufre por escasez y los conflictos están básicamente relacionados por la falta de agua o la carencia de infraestructura para sacarla del subsuelo y sanearla. Así, se requiere primero reducir el consumo mediante un uso más eficiente, lo que impacta en la demanda del recurso. Pero es también necesario aumentar la *oferta* a través de la restauración de ecosistemas, particularmente en la cuenca alta.

Las condiciones de México son adversas por la poca disponibilidad regional, donde existe una alta concentración poblacional y productiva y una limitante temporal (por la época de lluvias) espacial y estructural (condiciones áridas y semiáridas). Además, de los 653 acuíferos existentes 104 se encuentran sobreexplotados. Se trata precisamente de aquellos que generan la mayor riqueza económica al país y garantizan el abasto doméstico a la mayoría de la población. Por ello para atender a todas las demandas, la autoridad nacional se encuentra entre intereses legítimos opuestos debido al estrés hídrico. Ante este dilema, la CONAGUA empieza a identificar los conflictos más sobresalientes, desglosa los intereses involucrados y establece los primeros pasos para una negociación (mapeo del conflicto). Además, en la Ley Nacional de Agua (LAN) existe una prelación en el uso, donde se prioriza al consumo humanos, los servicios, los requerimientos industriales, los usos agropecuarios, y el agua verde requerida para mantener a los ecosistemas.

11 Otorgar permisos puede generar conflictos y al encargarse la CONAGUA tanto de concesiones como de conciliación de conflictos, se convierte en juez y parte del problema, lo que ha dificultado resolver de manera pacífica y definitivamente las controversias hídricas.

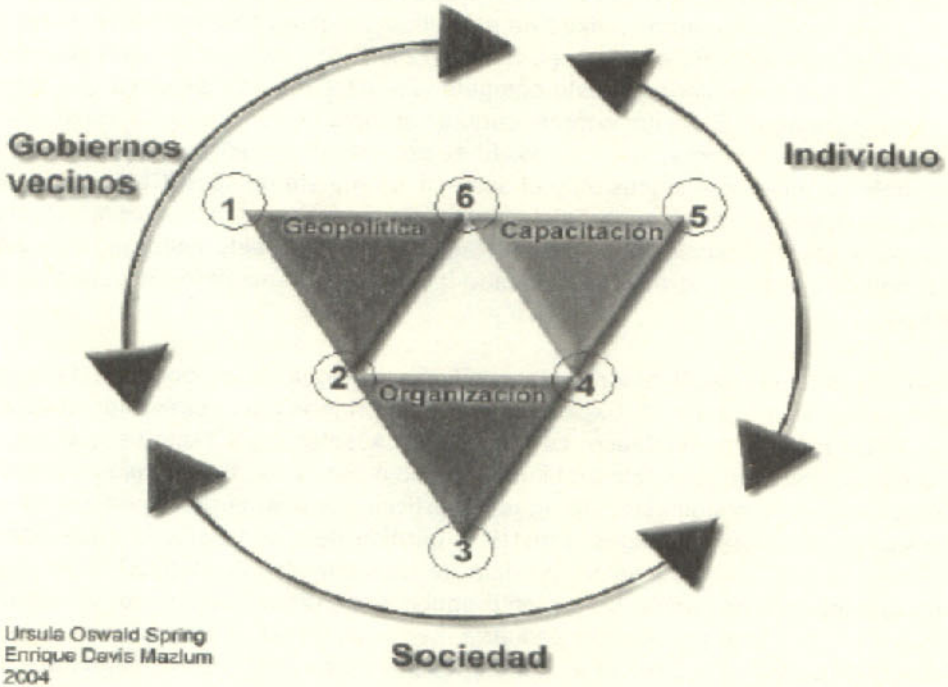


Figura 9 Modelo de hidro-diplomacia (adaptado de Davis, 2004)

Existen múltiples conflictos de agua en el país (Oswald 2006). En el caso de los 13 Pueblos de Morelos, el manantial Chihuahuita ha mostrado durante las últimas dos décadas deficiencia para el abasto a la población, particularmente durante la época de estiaje ya hace varias décadas. En el pasado ha habido múltiples enfrentamientos entre las comunidades que se abastecen en este manantial. Cuando el gobierno estatal autorizó en 2007 miles de casas de interés social, sin proporcionar una nueva infraestructura de abasto de agua a estos fraccionamientos, ni exigió a los empresarios de los fraccionamientos nuevos pozos, los 13 pueblos afectados se movilizaron, cerraron la autopista e iniciaron unidos una lucha legal por el usufructo del manantial que había sido equipado para ellos durante la presidencia de Lázaro Cárdenas. Obligaron al gobierno estatal y a los inversionistas privados a generar fuentes diferentes de abasto y en algunos casos se cancelaron los proyectos por falta de disponibilidad alternativa de agua y se dejó el manantial Chihuahuita a las comunidades autóctonas. Al igual que en otros conflictos como el de la Ciudad de México y la organización indígena mazahuas era necesario establecer un mapeo de conflicto (Oswald, 2006). En este último caso, la intervención de autoridades municipales y comunales-indígenas, el Distrito Federal, el estado de México y la CONAGUA intentaron

distender el conflicto, aunque cierto tortugismo en la negociación, agudizó varias veces el conflicto y amenazó al Distrito Federal a cerrar la válvula del agua del Cutzamala. En el Foro Mundial del Agua en 2007, las indígenas mazahuas hicieron ver que los servicios ambientales proporcionados por los indígenas nunca fueron pagados, dejándolos en la más profunda marginalidad.

Muchas veces en los conflictos hídricos se confunden los niveles durante una negociación, dado que frecuentemente conflictos locales se mezclan con intereses particulares, estatales e internacionales. Ello reduce la oportunidad de alcanzar un acuerdo y solucionar sin violencia la controversia. Por ello es importante primero acotar el problema y limitar el conflicto al tema del agua y mantenerlo en este campo, sin olvidar que la escasez del recurso es la causa principal de inconformidad. Una vez definido el nivel de las controversias, se empieza a desenredar el o los conflictos involucrados. Mediante este mapeo del conflicto se pueden identificar los actores, léase entidades gubernamentales, grupos sociales, empresas o individuos y sus intereses directos e indirectos. Se analizan los posibles aliados externos e internos, los enemigos existentes o los terceros que se pudieran beneficiar con el enfrentamiento. A partir de este análisis se establecen los problemas más sobresalientes, se identifican los intereses creados, los posibles beneficiarios o perdedores, los actos de corrupción o de desvío de fondos y se exploran soluciones iniciales factibles con los involucrados, que pudieran beneficiar a todos los participantes en el conflicto. Una táctica útil en esta fase es pedirle a la parte opuesta reflexionar acerca de una solución para los contrarios, ya que este proceso ayuda a sensibilizar a todos los interesados de la complejidad del problema y establecer intereses con prioridades claras de los intereses más vitales por parte de los actores involucrados.

Una vez establecido el diagnóstico participativo y entendido que el recurso es finito, se inicia el segundo paso que consiste en organizar a las personas involucradas y crear grupos afines que compartan intereses comunes para formular demandas concretas en cuanto al monto y la calidad del agua requerida, incluyendo el seguro por desalojo y el saneamiento de las aguas servidas. Este proceso técnico y social genera expectativas entre los interesados, abre el campo al diálogo e induce soluciones técnicas que pueden temporalmente reducir la tensión entre las partes. En esta fase surgen generalmente líderes natos en cada grupo, capaces de responsabilizarse más en el proceso de solución al interior y entre los grupos. En esta fase se establece la primera agenda de trabajo, donde se detallan sistemáticamente las tareas por hacer. Cuando los involucrados empiezan a entender que existen límites físicos en la oferta y que la demanda, se tiene que ajustar a estas condiciones, y sólo entonces se puede empezar a determinar la cantidad y calidad del agua requerida por cada sector. Por ejemplo, en el riego agrícola el cultivo del maíz no requiere de agua limpia, mientras que las hortalizas se pueden regar con aguas saneadas provenientes de plantas de tratamiento (PTA). Los industriales en su proceso de enfriamiento no necesitan agua potable y en todos los procesos productivos existen altos márgenes de ahorro, de reuso y de reciclamiento del agua.

Los mejores resultados para el ahorro se han obtenido con tarifas consensuadas que reflejan los costos de operación, administración y ahorro del líquido. Subsidios cruzados y tarifas bajas para un consumo mínimo, así como la separación entre aguas negras y grises y el reciclamiento de esta última en jardín y huerta protege a los más vulnerables e impulsa el ahorro del vital líquido. Campañas de reforestación, cuidado del ambiente, pago por servicios ambientales y manejo integral de la cuenca, así como saneamiento de los desechos líquidos y sólidos aumentan la oferta y la calidad del vital líquido (Figura 10). Simultáneamente existen técnicas que pueden reducir la demanda y aumentar la oferta. Del lado de la demanda se requiere primero organizar por sectores sociales y productivos a los usuarios. Cursos de capacitación, ahorradores de agua, micro-aspersión y micro-túneles pueden reducir hasta en 80% el agua e inciden también en menor contaminación puntual y difusa. Promover los cuatro RRRR: reducir, reusar, reciclar y reeducarse en el manejo del agua permite gestar una cultura del agua en el hogar, la industria y el campo, con lo que se reduce la demanda (Oswald, 1999). Mayor cantidad de agua, infraestructura nueva y otros apoyos pueden incentivar a los involucrados a seguir en el proceso de negociación y resolver pacíficamente el conflicto, mediante un mejor ahorro y un proceso justo de compartir el vital líquido.

Cuando los afectados se organizan (triángulo al interior del círculo en la Figura 9), se capacitan y entienden mejor la complejidad de la negociación, se establecen prioridades en la asignación del recurso. En esta fase la teoría de toma de decisiones racionales (*rational choice*) ayuda a priorizar los problemas y permite proponer una gestión del agua que beneficie a todos los involucrados. Esto es crucial en la conciliación ya que sin una situación de "ganar-ganar" no existe negociación duradera alguna. Si alguna facción es discriminada o se siente en desventaja, el conflicto estallará de nuevo y por lo mismo, es necesario técnica, política y socialmente buscar soluciones consensuales dentro de los márgenes financieros, técnicos y de disponibilidad de agua, tomando en cuenta además que el nivel existente de educación y el potencial de capacitación y adaptación de los involucrados (número 5 al interior de la Figura 9) puede limitar la solución. Una vez claramente definidos y priorizados los problemas, se buscarán las soluciones técnicas factibles, de acuerdo a las necesidades de los actores en pugna (número 4 en Figura 9) y se capacitará a los involucrados para que entiendan el dilema existente: estrés y contaminación de agua. Al principio de cualquier proceso de negociación se sugiere iniciar con el tema más sencillo y de menor carga emocional, que ofrece posibilidades de ser resuelto en tiempo relativamente corto. Ello genera ánimo entre los involucrados, sensibilidad hacia el contrario, y permite acotar a los interesados que quieren hacer abortar el proceso de conciliación no violenta.

En el caso de la cuenca internacional del Río Bravo y el Río Colorado, el convenio de 1944 beneficia a México, ya que el país recibe cuatro veces más agua que la que entrega a los EUA. Por tratarse de dos países vecinos que comparten dos cuencas, este conflicto se localiza en el ámbito geopolítico (Figura 9), aunque involucra también a entidades estatales, municipales (condados), comunidades y grupos de interés al interior de cada país

(los agricultores de riego). En ambos países la situación de sequía prolongada durante los años ochenta y noventa ha afectado la disponibilidad del agua. No obstante, el sector agrícola que utiliza la mayor parte del líquido, cuenta con márgenes amplios de ahorro en el riego. En ambos países era importante lograr un acuerdo consensual y de beneficio mutuo, aunque los intereses de corto plazo y las elecciones en Texas empezaron a complicar la negociación en 2004. En la conciliación de 2005, algunos ecólogos intervinieron, ya que se trata de una región árida e hiper-árida, pero con uno de los desiertos más biodiversos (desierto de Chihuahua) y un río que empezaba a colapsarse por el exceso de agua extraída, luego de una prolongada temporada de sequía.

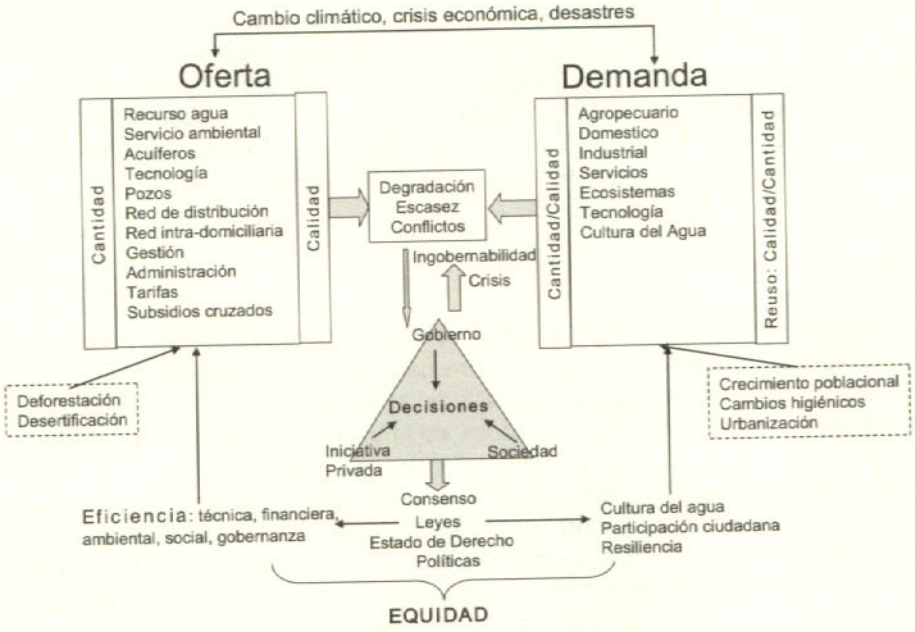


Figura 10. Eficiencia y equidad en el manejo del agua (Fuente: Oswald y Sandoval, 2008)

En ese momento difícil una circunstancia externa ayudó a avanzar en la solución. Una demanda por parte de los ecologistas norteamericanos en contra de los granjeros de Texas y una orden judicial que ordenó dejar más agua para salvar al pez gris que se encontraba en proceso de extinción, ayudó a México en la negociación. Ambos países mostraban interés en conservar la biodiversidad y resolver el problema de la deuda de agua de 2.5 mil millones de m^3 que tenía México con los EUA (Oswald, 2006). El Tratado estipulaba entregar el agua mayormente desde el río Conchos y sus presas. Si se sumaba el aporte de todos los afluentes del lado mexicano que tributaban a la cuenca y se tomaba en serio el criterio de la conservación ambiental, era factible pagar la deuda hídrica, a la vez que se facilitaba la recuperación del pez gris.

No obstante, la entrega del agua en México se obligó al país a reducir la superficie destinada al riego agrícola y no faltaron voces que se oponían a dicho pago y promovían la anulación del Tratado. Por ello se requería primero organizar a los diversos sectores de la sociedad, después capacitarlos y hacerles entender la compleja realidad de las condiciones climáticas y de las ventajas del Tratado. A su tiempo, fue más fácil trabajar con sectores organizados: el primario, los industriales, la maquila, los negocios de servicios y la demanda doméstica del agua por colonia, por ayuntamientos o por sistemas de agua potable, por colectores o por PTA, mientras que se reservaba el agua subterránea al consumo humano. Adicionalmente, se instrumentaron procesos para hacer más eficiente el riego en la agricultura, la ganadería, la industria, los servicios y el consumo doméstico. Una medición estricta en el consumo y su pago oportuno mejoraron el control sobre el monto de agua utilizada. Los acuerdos logrados y la tecnología desarrollada requerían de procesos de capacitación entre los diversos sectores organizados, con el fin de promover un cambio en la cultura del agua y así crear conciencia que el agua es un bien escaso que pertenece a todos y que requiere de ahorros en zonas áridas.

Algunas reflexiones conclusivas

El cambio ambiental global y el CC en particular han generado múltiples y nuevos riesgos y amenazas. La compleja interrelación entre naturaleza y actividades humanas obligan a una seguridad del agua, que va más allá del entendimiento militar y abarca aspectos ambientales, sociales, humanos, de género, de la economía y de la organización social. Mediante una gobernanza participativa y una conciliación de conflictos a lo largo del proceso de organización e interacción social es posible ordenar territorial y ambientalmente una región y cuidar mejor los recursos naturales, sin por ello deteriorar la calidad de vida de los participantes, ni afectar su patrimonio y su potencial productivo. Ello reduce los riesgos ante nuevos conflictos y enfrentamientos mayores, que pudieran obligar a la gente a abandonar sus comunidades por falta de alimentos, de tierras o de agua y por ende, encontrarse ante un dilema de supervivencia (Oswald y Brauch, 2009b).

Las vulnerabilidades que surgen a partir del CC obligan a las autoridades, pero también a los ciudadanos, léase usuarios del agua, a jerarquizar la disponibilidad, el monto y la calidad del agua requerida. Tiene que tomarse en cuenta que la desertificación, el deterioro de los suelos y las sequías (DLDD) son procesos naturales en tierras secas, que se van a agudizar con el CC. Por ello es importante organizar a las comunidades para atender preventivamente posibles emergencias y ahorrar y reducir el consumo de agua, así como priorizar los usos más indispensables hacia un desarrollo armónico de toda la región. Probablemente en la zona norte del país la agricultura y sobre todo la de exportación no es el mejor uso que se puede dar al agua, sobre todo cuando ésta proviene del subsuelo y de acuíferos sobreexplotados. Los procesos productivos fuera del sector primario, pero también una producción agropecuaria eficiente y consciente del ahorro del agua pudiera

ofrecer alternativas de una agricultura sustentable de cultivos áridos en el largo plazo y generar un bienestar para todos los involucrados.

Sin duda alguna el ajuste de la demanda a la oferta del vital líquido con una promoción de las 4 RRRR (reducir, reusar, reciclar y reeducarse) permite reusar aguas saneadas, evitar contaminación y crear una cultura de agua, donde participan mujeres, niños, hombres y ancianos en un manejo alternativo del vital líquido. Una gestión integral del agua significa cuidar todos los recursos naturales mediante la reforestación, la conservación de la biodiversidad y la protección de las fuentes y de las cuencas de los ríos, de los cuerpos de agua y de los acuíferos.

Finalmente, prevenir, educarse y capacitarse en una nueva cultura del agua es más importante que lamentarse ante la escasez, la contaminación y los conflictos. Ello incluye la captura de agua pluvial, el saneamiento de aguas usadas y los procesos de ahorro, así como la eficiencia en el manejo. Los medio de comunicación pueden jugar un rol al enajenar a una sociedad y al provocar nuevos conflictos y enfrentamientos, o bien al apoyar una cultura preventiva y cuidadosa del agua. Los mapas de riesgos ante nuevos y más severos fenómenos hidro-meteorológicos, las nuevas tecnologías de optimización del agua y el entrenamiento de la población para responder ante estos nuevos desastres socio-ambientales, permiten salvar vidas y reducir los gastos por eventos hidro-meteorológicos extremos, a la vez que generan resiliencia entre la población para vivir en condiciones naturales crecientemente más adversas. Este proceso de ordenamiento, de organización de apoyo tecnológico, de capacitación y de negociación a todos los niveles (geopolítica) lleva a los diversos sectores sociales, potencialmente opuestos o algunos en conflictos abiertos por el acceso al agua, hacia un proceso de cooperación y colaboración, donde todos se benefician. Ello permite al gobierno, a los distintos sectores de la sociedad y a las empresas a promover una cultura de prevención, en lugar de una reacción tardía, donde entonces los problemas rebasan los recursos disponibles. La educación preventiva y la alerta temprana de una sociedad organizada permiten enfrentar los retos que planeta el cambio climático sin destruir el tejido social existente.

Literatura citada

Alcamo, Joseph, Endejan, Marcel. 2002, The Security Diagram - An Approach to Quantifying Global Environmental Security. En: Eileen Petzold-Bradley, Alexander Carius, Arpád Vinvze (eds.) 2002: Responding to Environmental Conflicts Implications for Theory and Practice. NATO ASI Series (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers): 133-147.

Altieri, M. 1999, Los mitos de la biotecnología agrícola: algunas consideraciones éticas. En: Formación Ambiental, vol. 9, núm. 11, pp. 13-17.

Arroyo Picard, Alberto, Alejandro Villamar. 2002, Resultados del Tratado de Libre Comercio de Amé-

rica del Norte en México, REMALC, México, D.F.

Bächler, Günther, Kurt R. Spillmann y Mohamed Suliman (eds.). 2002, Transformation of Resource Conflicts: Approach and Instruments, Peter Lang, Berna Suiza.

Beck, Ulrico. 2001, Políticas ecológicas en la edad del riesgo. Editorial El Roure, Barcelona, España

Brauch, Hans Günter. 2005, Environment and Human Security, InterSecTions, vol. 2, UNU-EHS, Bonn, Alemania

Brauch, Hans Günter, Úrsula Oswald Spring, John Grin, Czeslaw Mesjasz, Pal Dunay, Navnita Behera Chadha, Béchir Chourou, P.H. Liotta, Patricia Kameri-Mbote, (eds.). 2008, Globalisation and Environmental Challenes: Reconceptualising Security in the 21st Century, Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, vol. 3, Springer-Verlag, Berlín, Alemania

Brauch, Hans Günter, Úrsula Oswald Spring, John Grin, Czeslaw Mesjasz, Heinz Krummenacher, Navnita Behera Chadha, Béchir Chourou, Patricia Kameri-Mbote (eds.). 2009, Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts, Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, Springer-Verlag, Berlín, Alemania

Buzan, Barry, Ole Wæver y Jaap de Wilde. 1998, Security. A New Framework for Analysis, Rienner, Boulder, Co. USA

CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2008, Inundaciones en Tabasco. Evaluación socioeconómica, (Ricardo Zapata Martí y Norlang Marcel García Arróliga) abril 2008, CENAPRED/CEPAL, México, D.F.

Chávez Adolfo, Abelardo Ávila y Teresa Shamah. 2006, Una nueva política alimentaria. Seguridad alimentaria, autosuficiencia y acciones para lograr hambre 0 en México. En: José Luís Clava (ed.), Alternativas para México, Cámara de Diputados e IIEc-UNAM, México, D.F.: 207-230.

Congreso de la Unión. 2009, Resumen de Prensa del Congreso de la Unión en el mes de mayo. Palacio Legislativo, México D.F.

Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación 8CNULD, UNCCD en inglés). 2002, Informe Final. Reunión para el lanzamiento del TON5 sobre conocimientos, tecnologías y prácticas tradicionales en la luchas contra la desertificación y mitigación de la sequía en América Latina y el Caribe, UNCCD, Bogotá, Colombia 23-25 de mayo, 2007.

CNA (Comisión Nacional del Agua). 2008, Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Estadísticas del Agua en México 2008, <http://www.cna.gob.mx/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=91b62c94-787c-4006-bc90-e5b1692ce07|%20%20%20%20Infraestructura%20

Hidr%C3% A1ulica

CONABIO (Comisión Nacional de Biodiversidad). 1998, La Diversidad Biológica de México: Estudio del País, CONABIO, México, D.F.

Dalby, Simon, Hans Günter Brauch y Úrsula Oswald Spring. 2008, Towards a Fourth Phase of Environmental Security. En: Hans Günter Brauch (ed.). 2008, Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts, Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, vol. 4, Springer-Verlag, Berlin –Heidelberg, pp. 787-796.

Davis Mazlum, Enrique. 2004, Hidrodiplomacia y la función de la COCEF y BDAN en el desarrollo sustentable en la zona fronteriza de México y Estados Unidos, Tesis de maestría del ITESM, dirigida por Úrsula Oswald Spring, Instituto Tecnológico de Monterrey, campus México, D.F.

Esteva, Gustavo y Catherine Marielle. 2003, Sin maíz no hay país, CONACULTA, México, D.F.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2009, More People than ever are victims of hunger, En: FAO 2009: http://www.fao.org/fileadmin/user_ upload/newsroom/docs/ Press%20release%20june-en.pdf .

Fuentes, Claudia y Francisco Rojas Aravena. 2005, Promover la Seguridad Humana: Marcos Éticos, Normativos y Educacionales en América Latina y el Caribe, UNESCO/ FLACSO, Paris.

García Plutarco, Emilio. 2004 Conflictos agrarios y pueblos indios: de la contrarreforma agraria a los llamados focos rojos. En: Oswald, U. (ed.), 2004, Resolución noviolenta de conflictos en sociedades indígenas y minorías, Coltlax, CLAIP, Fundación IPRA y F. Böll, Mexico, D.F., pp. 261-274.

Haq, Mahbub ul. 1996. Reflections on Human Development, Oxford University Press, Oxford.

Held, David y Anthony McGrew (eds.). 2007, Globalization Theory: approaches and controversies, Polity Press, Cambridge.

Held, David, Anthony McGrew, David Goldblatt, Jonathan Parraton. 1999, Global Transformations: Politics, Economics and Culture, Polity Press, Cambridge.

Homer-Dixon, Thomas F. y Jessica Blitt (eds). 1999, Ecoviolence. Links among environment, population, and security Rowman and Littlefield, Lanham.

Homer-Dixon, Thomas. 1991, On the Threshold: Environmental Changes as Causes of Acute Conflict. En: International Security, vol. 16, núm. 2, pp. 76-116.

Homer-Dixon, Thomas. 1994, Environmental Scarcity and Violent Conflict: Evidence from Cases. En: International Security, vol. 19, núm 1, pp. 5-40.

Homer-Dixon, Thomas. 1999, Environment, Scarcity, and Violence, Princeton University Press, Princeton, N.J.

Homer-Dixon, Thomas. 2000, The Ingenuity Gap, Alfred A. Knopf, Nueva York.

INEGI (Instituto Nacional de Geografía y Estadística). 2008, Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2007 (ENIGH), INEGI, Aguascalientes, México.

IFRC-RCS (International Federation of the Red Cross – Red Crescent Society). 2007, World Disaster Report 2007. Focus on Discrimination, Kumarian, Bloomfield y Eurospan, Londres.

IISS (Intenational Institute for Strategic Studies). 2008. Strategic Comments, p. 2.

ILO (International Labour Organization. 1999, Country studies on the social impact of globalization: Final report, <http://www.ilo.org/public/english/standards/ relm/gb/docs/gb276/sdl-1.htm#A%20 simple%20definition%20of%20 globalization>.

ILO (International Labour Organization). 2009, ILO Director-General Juan Somavia's Opening Statement. ILO Summit on the Global Jobs Crisis, <http://www.ilo.org/global/About_the_ILO/ Media_and_public_information/events/jobssummit/lang--es/index.htm>.

Magaña, Víctor (ed.). 1999, Los Impactos de El Niño en México, IAI, SEP-CONACYT y Dirección General de Protección Civil, México, D.F.

Magaña, Víctor, Juan Matías Méndez, Rubén Morales y Cecilia Millán. 2004, Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México, en Julia Martínez y Adrián Fernández (eds). 2004, Cambio Climático: una visión desde México, SEMARNAT-INE, México D.F., pp. 203-214.

Monterroso, Carlos y Fátima Rosales. 2006, Modelo de impacto en el cultivo del maíz por el cambio climático, mapa.

Nadal, Alejandro y Timothy A. Wise. 2004, The Environmental Costs of Agricultural Trade Liberalization: Mexico-U.S. Maize Trade under NAFTA, Working Group on Development and Environment in the Americas, June, Discussion Paper number 4, pp. 1-30 (actualizado en 2008).

Oki, T. et al. 2002, Virtual Water Flow in 2000, UNESCO-IHE, Delft.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2005,

World Water Crisis, UNESCO, París, <www.choike.org/nuevo/informes/676.html>.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico). 2009, El desafío del agua: Comprendiendo la problemática, <http://www.oecd.org/document/54/0,3343, fr_2649_37425_36198134_1>.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico). 2008. International Migration Outlook 2008 <www.oecd.org/dataoecd/31/25/ 41275950. pdf.>.

Oswald Spring, Úrsula. 1999, Fuenteovejuna o caos ecológico, CRIM-UNAM, Cuernavaca. Mexico

Oswald Spring, Úrsula, M. L. Hernández. 2006, El valor del agua. Un estudio socioeconómico de un conflicto ambiental, COLTLAX-CONACYT, México, D.F.

Oswald Spring, Úrsula. 2008a, Globalization from Below: Social Movements and Altermundism - Reconceptualizing Security from a Latin American Perspective, en Brauch et al., Globalisation and Environmental Challenges: Reconceptualising Security in the 21st Century, Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, vol. 3, Springer-Verlag, Berlín, pp. 379-402.

Oswald Spring, Úrsula. 2008b, Gender and Disasters. Human, Gender and Environmental Security: A HUGE Challenge UNU-EHS, Source vol. 6, Bonn.

Oswald Spring, Úrsula y Francisco Sandoval. 2008, Presentación el valor del agua, Primer Encuentro Universitario del Agua, Cocoyoc, noviembre, organizado por la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Oswald Spring, Úrsula y Hans Günter Brauch. 2008 Reconceptualizing Security in the 21st Century: Conclusions for Research and Policy-making, en: Hans Günter Brauch, Úrsula Oswald Spring, Czeslaw Mesjasz, John Grin, Pal Dunay, Navitna Chadha Behera, Bechir Chourou, Patricia Kameri-Mbote y Peter Liotta (eds). 2008, Globalisation and Environmental Challenges: Reconceptualising Security in the 21st Century, Springer Verlag, Berlín, Alemania: 941-954.

Oswald Spring, Úrsula. 2009a, Globalización y Desafíos de la para la Seguridad Humana en América Latina. En: Oswald y Brauch (eds), 2009 Reconceptualizar la Seguridad en el Siglo XXI en América Latina, CRIM/CEICH/CCA-UNAM y Senado de la República, México D.F.

Oswald Spring, Úrsula. 2009b, Food as a New Human and Livelihood Security Challenge. En: Brauch, Hans Günter; Oswald Spring, Úrsula; Grin, John; Mesjasz, Czeslaw; Kameri-Mbote, Patricia; Behera, Navnita Chadha; Chourou, Béchir; Krummenacher, Heinz (eds), 2009, Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts, Springer Verlag, Heidelberg, Alemania: 473-502.

Oswald Spring, Úrsula. 2009c, A HUGE Gender Security Approach: Towards Human, Gender and

Environmental Security. En: Brauch *et al.*, (ed). 2009, Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts, Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, Springer Verlag, Berlin, pp. 1165-1190.

Oswald Spring, Úrsula y Hans Günter Brauch. 2009a, Reconceptualizar la Seguridad en el Siglo XXI en América Latina, CRIM/CEICH/CCA-UNAM y Senado de la República, México D.F. p. 11-12

Oswald Spring, Úrsula y Hans Günter Brauch. 2009b, Securitizar la tierra. Aterrizar la seguridad, UNCCD, Bonn.

Oswald Spring, Úrsula (en prensa), Social Vulnerability, Discrimination and Resilience-building in Disaster Risk Reduction. En: Brauch *et al.* (ed), Coping with Global Environmental Change, Disasters and Security. Threats, Challenges, Vulnerabilities and Risks, Springer Verlag, Berlin, e.p.

PEW, Hispanic Center. 2009, Hispanics and the Economic Downturn: Housing Woes and Remittance Cuts, Report, 8 de enero, Pew Hispanic Center, Washington, D.C.

Rangel Medina, Miguel; Rogelio Monreal Saavedra; Christopher Watts, en prensa. Los acuíferos costeros de Sonora, México, un reto de análisis hidrogeológico para mantener su equilibrio sustentable. En: Oswald y Sánchez (eds). Retos de la Investigación del Agua en México, en prensa.

Riod.MEx. 2008, Estrategia Nacional de Manejo Sustentable de Tierras, <www.riodmex.org/documentos%20de%20descarga/00_Portada_e_Indice.pdf.>

Rojas Aravena, Francisco; Goucha, Moufida (ed). 2002, Seguridad Humana, Prevención de Conflictos y Paz, FLACSO- Santiago de Chile y UNESCO- Paris.

Rosenfeld, Daniel, Yinon Rudich, Ronen Lahav. 2001, Desert dust suppressing precipitation: A possible dersertification feedback loop, en National Oceanic and Atmospheric Administration, Boulder, 13 de marzo, 2001.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2008, Importación y exportación de maíz, SAGARPA, Boletín Mensual, diciembre 2008.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2007, citado en Jorge D. Etchevers Barra, Jesús David Gómez Díaz, Alejando I. Monterroso Rivas y Juan Ángel Tinoco Rueda. 2007, Formulación de Indicadores para Evaluar y Monitorear la Desertificación en México, SEMARNAT, INE y COLPOS, México, D.F., p. 56.

SEMARNAT-CONAFOR-INE (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión

Nacional Forestal, Instituto Nacional de Ecología. 2007, Reporte sobre Los efectos de las variaciones climáticas y las actividades humanas en la degradación de tierras, en México, <http://www.conafor.gob.mx/pdfs/Efectos_de_ variacion_climatica_y_del_hombre_en_la_ degradacion_de_tierras.pdf>.

SEMARNAT-INE (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología). 2006, Tercera Comunicación Nacional que México presentó ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, noviembre de 2006.

Sen, Amartya. 1992, Inequality Re-examined. New York: Russell Sage Foundation - Harvard- Harvard University Press.

Sen, Amartya. 1995, Mortality as an Indicator of Economic Success and Failure, Innocenti Lectures innlec95/2, UNICEF Innocenti Research Centre, Ginebra.

Stern, Nicolas. 2006, Stern Review on the Economics of Climate Change <www.hm-treasury.gov.uk/ stern_review_report.htm>.

UNDP (United Nations Development Program), 1994, Human Development Report 1994, Oxford University Press, New York.

UNEP (United Nations Environmental Program), 2001, Global Environmental Outlook UNEP, New York.

Wæver, Ole. 2008, Peace and Security: Two Evolving Concepts and Their Changing Relationship . En: Brauch *et al.* (ed), Globalization and Environmental Challenges: Reconceptualizing Security in the 21st Century. Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, vol. 3, Springer Verlag, Berlin, pp. 99-112.

Wæver, Ole. 2008a, The Changing agenda of Societal Security. En Brauch *et al.* (ed), 2008, Globalization and Environmental Challenges: Reconceptualizing Security in the 21st Century. Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, vol. 3, Springer Verlag, Berlin pp. 581-593.

Weber, Max. 1987, Economía y Sociedad, FCE, México, D.F.

Wolfers, Arnold. 1962, National Security as an Ambiguous Symbol. En: Arnold Wolfers (ed). 1962, Discord and Collaboration. Essays on International Politics, John Hopkins University Press, pp. 147-165.

Ziegler, Jean y Gregoire Kalbermatten. 2008, Human Rights and Desertification, UNCCD, Bonn, Alemania

CAPITULO 12

Cambio climático y conflicto social: tensiones, cooperaciones y geopolíticas del agua

Luc Descroix[1], José Luis González Barrios[2]

[1]Institut de Recherche pour le Développement, Laboratoire d'Études des Transferts en Hydrologie et Environnement (IRD-LTHE) Grenoble, Francia

[2]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (INIFAP CENID-RASPA, México)

Índice

Resumen
Abstract
Introducción
Objetivo
Metodología
Resultados y Discusión
- Cambio climático y cambio de uso del suelo
- Cambio climático y el recurso agua
- Como el hombre influye sobre el recurso
- Conflictos frente al recurso agua
- Acuerdos y manejo del agua

Conclusiones
Literatura citada

Resumen

El cambio climático tiene un impacto directo sobre el recurso agua, pero la demografía, el cambio de uso del suelo y la geopolítica mundial impactan aún más el estrés hídrico en el planeta.
Este estudio pone en evidencia el peso de los factores humanos en la evolución del recurso agua y la percepción del riesgo de escasez en las tensiones que se generan. Se presentan ejemplos de escasez climática y de fricción política para mostrar que el estrés hídrico es una noción relativa que cambia mucho en el tiempo y en el espacio. Finalmente se muestra que el agua puede ser un factor de unidad y cooperación, como sucede en la mayoría de los casos, a través de autoridades hidráulicas o de acuerdos transfronterizos que pueden adoptar algún tipo de esquema como el del Manejo Integrado del Recurso Agua (MIRA) surgido a principio de la década del 2000.

Abstract

Climate change directly impacts water resources, but demography, land use changes and geopolitics can dramatically increase the world hydric stress.
This study highlights the influence of human factors on water resource evolution and the social perception of water scarcity hazard in geopolitics tensions. Examples are given to illustrate whether climate and society can combine to create or exaggerate scarcity; hydric stress is a relative concept which changes significantly in space and time.
Water could be a factor of cooperation, through river management authorities or transboundaries agreements; these organizations should adopt a new type of water management, appeared at the beginning of the 2000s, the Integrated Water Resources Management (IWRM).

Introducción

El recurso agua es indispensable para la vida y para todas las actividades económicas. Existe un gran número de estudios dedicados al análisis y a la historia del aprovechamiento del agua y a la previsión de este recurso para las próximas décadas (Postel, 1999; De Villiers, 1999; Pearce, 2006; Orsenna, 2008). Muchas publicaciones de geopolítica y de ciencias han dedicado ediciones especiales a estos temas (Sciences et Vie, 2000; CNRS-DRH, 2000; Lacoste, 2001; Manière de voir, 2002; Pour la Science-Scientific American, 2008; Monde Diplomatique, 2009). Mucha modelación de escenarios se ha dedicado a estudiar cual podría ser el impacto del cambio climático observado en las últimas décadas. Se sabe que el cambio climático es debido en gran parte al impacto de las actividades humanas sobre la atmósfera. Se supone que el volumen total de agua en el planeta no debe de cambiar, sin embargo su repartición espacio-temporal está evolucionando muy rápidamente en los últimos tiempos y esto se debe al cambio climático relacionado con las actividades humanas.

En muchos casos, el factor humano puede impactar al recurso hídrico directamente, como en los cambios de uso del suelo, pero también el peso de la demografía, basta para explicar la escasez relativa del recurso agua. Este estrés hídrico está muy ligado a tensiones geopolíticas. Los casos de escasez absoluta de agua son fáciles de explicar en cambio es indispensable analizar los numerosos casos de escasez relativa (fuerte consumo en un ambiente de recurso abundante) y los numerosos casos de estrés hídrico "geopolítico" o más bien "hidropolítico".

Después de resumir el problema global del recurso agua, este capítulo pretende analizar las diferentes fuentes de estrés hídrico y determinar cómo las actividades humanas compiten o se asocian con el cambio climático para modificar la cantidad, la calidad, el régimen o el estado del recurso agua.

En ciertas partes del planeta las acciones del hombre provocan aumentos en el escurrimiento hidrológico superficial o subterráneo mientras que en otras contribuyen a una desertificación persistente.

Generalmente se ignora que la palabra "rivalidad" proviene de "rivera" donde los vecinos del río pueden competir y ser rivales; y que los conflictos por el acceso al agua son tan viejos como la humanidad (Margat, 2000). Al delimitar sus territorios, las comunidades humanas utilizaron más a menudo los grandes ríos como fronteras que los parteaguas de una cuenca, excepto cuando había sierras elevadas. Eso explica que los limites de las cuencas hidrográficas no coinciden con las entidades políticas y administrativas (Margat, 2000). Algunos países tienen el nombre de un río: Uruguay, Paraguay, Niger, Senegal, Gambia, Congo. Pero solo este último ejemplo es una coincidencia casi perfecta de un país que está delimitado por la cuenca de un río (Pourtier, 2003). En 1999 Sandra Postel emitió la hipótesis de que ciertas civilizaciones de Mesopotamia pudieron desaparecer por causas humanas como la intensa sobre explotación del suelo y del agua; no forzosamente por un cambio climático como se pensaba anteriormente. Sin embargo en estas mismas áreas donde apareció la agricultura hace 5000 o 6000 años se sigue practicando la agricultura de riego con rendimientos aceptables a pesar de tantos siglos de agricultura;

eso es una lección de manejo sostenible que contrasta con nuestra época en la que en pocos años se echan a perder extensas áreas de riego por un mal manejo del agua y del suelo. Así pues, el área de la antigua Mesopotamia, el bajo valle del río Indus y el valle del río Nilo mantienen el mismo tipo de agricultura desde hace milenios; en América también hay ejemplos milenarios. En Perú, el antiguo imperio de Chimú se consolidó en el cultivo de riego del maíz hace 3000 años, actividad que duró 2500 años (Postel, 1999). En el valle de Tehuacán (Puebla, México) empezó la agricultura hace 4000 años y desarrolló un muy notorio sistema de riego (Postel, 1999). Más recientemente, una civilización de riego permaneció más de mil años en Hohokam, cerca de la actual Phoenix Arizona (EEUU). La duración de esas economías rurales da origen al concepto de "sociedad hidráulica" acuñado por Wittfogel en 1957.

Objetivo

El objetivo de este capítulo es analizar a través de ejemplos las contribuciones del cambio climático, y de las acciones humanas, a la aparición de conflictos y problemas debidos a la calidad o a la cantidad de agua.

Metodología

A través del estudio bibliográfico se analizan las diferentes formas de estrés hídrico y de conflictos sociales y diplomáticos debidos al agua, así como los tipos de manejo y acuerdos implementados para limitar todos los tipos de conflictos.

Resultados y discusión

La Figura 1 presenta el mapa del estrés hídrico a nivel mundial (recurso utilizado/ recurso disponible) con la persistencia de una *escasez climática estructural*. El estrés hídrico puede ser producido temporalmente por aspectos agrícolas o por el manejo inapropiado del agua; en 1976 hubo una sequía en toda Europa Occidental, caracterizada por un déficit de lluvias en primavera y verano. Hasta los años sesenta, el principal cultivo en las llanuras de Europa Occidental había sido el trigo, que requiere poca agua y que estaba adaptado al clima; pero después de la constitución de la Comunidad Económica Europea en 1956, se promovió el cultivo del maíz, que hasta entonces se importaba de Argentina o de EEUU esencialmente para el ganado. En 15 años se extendió mucho, en Europa Occidental, la superficie dedicada al maíz que requiere 200 mm más de lluvia que el trigo (aproximadamente 800 mm) en clima templado. En 1976 la cosecha de maíz fue mucho más baja que la de los años anteriores y en vez de volver al cultivo del trigo se instalaron sistemas de riego con aguas subterráneas o superficiales en una zona de clima templado de tipo oceánico en el suroeste y el centro de Francia (regiones donde la pluviometría media anual

es de 600 a 800 mm). En este caso, el estrés hídrico fue debido a un cambio agrícola y parcialmente a un fenómeno social; el consumo de carne aumentó mucho en Europa requiriendo grandes cantidades de maíz para alimentar el ganado bovino. Pero ese estrés hídrico fue temporal ya que Europa Occidental es naturalmente una región húmeda.

Figura 1. Mapa del estrés hídrico en el Mundo, de acuerdo a www.populationdata.net/eau/index.php

En el Suroeste de EEUU se extienden el mayor desierto norteamericano (el Desierto Chihuahuense) y el más seco (el Desierto Sonorense). En esta región se desarrolló el riego agrícola de manera intensiva durante la gran crisis de 1929-1933 mediante una política voluntarista e intervencionista del estado americano. Grandes presas como la Hoover, inaugurada en 1933, permitieron el riego de extensas áreas de riego. Actualmente la población de esta área es muy numerosa y el agua que se dedicaba antes a los cultivos, en proporciones siempre crecientes, es comprada por las sociedades que proveen de agua a las ciudades de California y de los otros estados de esta región; una parte significativa de estos volúmenes de agua sirve para llenar albercas y compensar la evaporación en jardines alrededor de estas ciudades ubicadas en el desierto. El estrés hídrico aquí es debido a una evolución social: el alto nivel de vida aumentó el consumo de agua *per cápita*; como creció mucho la población de estas regiones dinámicas, el consumo de agua doméstica e industrial impuso disminuir la proporción del agua dedicada al riego agrícola.

En China, el crecimiento económico ha ido disminuyendo la extensión de tierras de cultivo para la creación de actividades no agrícolas como industrias y áreas recreativas. Ante las críticas de especialistas extranjeros y de una parte de la sociedad china, la autoridad hidráulica argumenta sin complejos que un metro cúbico de agua en esas actividades produce un valor agregado hasta 70 veces más elevado que en la agricultura.

Actualmente los países que más sufren de estrés hídrico están en las zonas áridas o semiáridas que dieron origen a las primeras civilizaciones agrícolas del planeta; aunque se haya demostrado su sostenibilidad, como su población crece de manera muy acelerada desde hace décadas, estos países tienen ahora problemas de agua muy graves.
Aunque los usos del agua: domésticos, industriales o agrícolas pueden consumir, contaminar o cambiar las propiedades del agua, lo que más interesará aquí serán los cambios que puede sufrir el recurso agua por el cambio climático y por el cambio de uso del suelo.

Cambio climático y cambio de uso del suelo

El cambio climático y el recurso agua

En la década de 1990 se comprobó científicamente que las actividades humanas estaban impactando al clima mundial; hasta esa década se pudo mantener la duda sobre el origen humano del calentamiento del planeta. Desde entonces, la comunidad científica tiene la certeza de que el aumento de CO_2 en la atmósfera terrestre hace aumentar el efecto invernadero; por otra parte el debilitamiento de la capa de ozono cerca de los polos tuvo impactos ambientales y de salud pública.

En la misma década, numerosos países situados alrededor de la "media luna fértil" del Medio Oriente se dieron cuenta que la escasez de agua necesitaba soluciones drásticas no solo para garantizar el crecimiento económico sino también para el consumo de sus habitantes. El riego se impuso en esas áreas por ser indispensable para la agricultura debido a la escasez absoluta o debido al hecho que la temporada de cultivos (verano) se desarrolla en la temporada seca (clima mediterráneo) y en estas circunstancias se pudieron desarrollar oasis con aguas subterráneas poco profundas, o áreas de riego con aguas traídas de lejos por ríos como el Nilo, el Indus, el Tigris y el Eufrates). Los conceptos de *sociedad hidráulica* y de *despotismo oriental* se basan en el hecho de que el manejo de un sistema en el cual se comparte un recurso (agua por ejemplo) requiere reglas que sean aceptadas por todos los actores.
La mayor parte de los especialistas del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, piensan que el cambio climático va a provocar mayores perturbaciones climáticas en todo el planeta: tormentas, huracanes, inundaciones, sequías, déficits pluviométricos y también hay un consenso en pensar que el problema de sequía se va a acentuar en las áreas tropicales áridas o semiáridas, lo que podría ser compensado por mayores aportes de agua en áreas templadas o ecuatoriales.

Para saber cómo puede influir el cambio climático en el recurso agua lo más fácil es estudiar el mayor cambio climático que se haya registrado en el planeta desde el principio del monitoreo meteorológico. La región Subsahariana y generalmente toda África occidental registraron una disminución de 25 a 30% de su pluviometría durante más de 25 años (de 1968 a 1995) en un área de varios millones de kilómetros cuadrados (Figura 2).

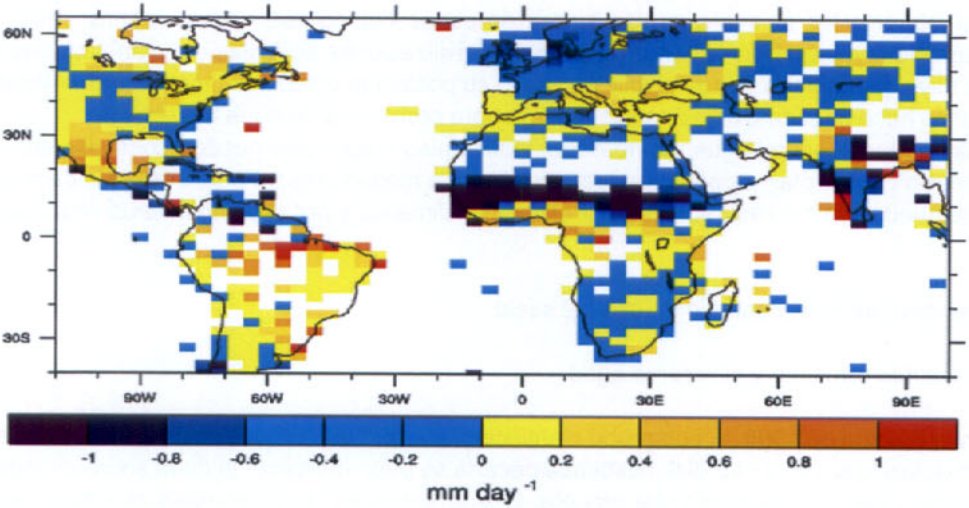


Figura 2. Diferencia pluviométrica de julio + agosto (en mm por día) entre dos series de tiempo (de 1967 a 1998) – (de 1948 a 1966), de acuerdo a Hulme (1998)

Debido a esa disminución pluviométrica, los ríos de África occidental tuvieron una disminución en su caudal hidrológico promedio. El más notable fue el del río Níger, tercer río más importante de África después del Congo y del Nilo (Béthemont, 2000).

La Figura 3 presenta el caudal hidrológico anual del río Níger que disminuyó dos veces más su valor que el de la precipitación recibida en su cuenca; es decir que la cuenca duplicó el efecto de la disminución de la precipitación. Esto se debe esencialmente al tipo de escurrimiento *Hewlettiano* que se observa en la cuenca alta del río Níger formada por territorios de Guinea, Mali y Costa de Márfil (Descroix *et al.*, 2009). El escurrimiento *Hewlettiano* se produce esencialmente cuando el suelo está saturado para lo cual necesita una cierta cantidad de lluvia. Sin embargo al disminuir la pluviometría no se infiltra suficiente agua para saturar el suelo. Pero si a pesar de todo se alcanza a saturar el suelo, la parte de agua precipitada que queda para provocar el escurrimiento sub-superficial es mucho más baja que en un año con precipitación normal (Andersen *et al.*, 2005).
Este problema no se presenta aguas abajo de la cuenca del Níger al norte de la isoyeta de los 700mm (Figura 4) donde se observa un aumento del caudal hidrológico desde hace más de 40 años, es decir desde el inicio de la gran sequía climática de la región Subsahariana 1968-1995 (Besnier *et al.*, 2006; Descroix *et al.*, 2009).

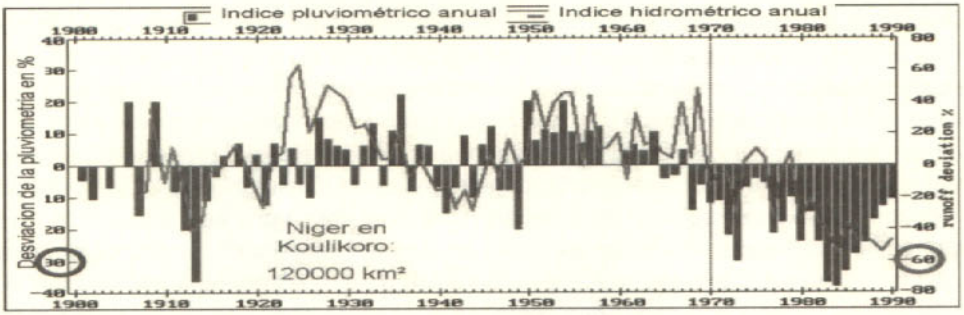


Figura 3. Evolución de la pluviometría y del caudal hidrológico en la cuenca alta del río Níger (estación hidro-climatológica de Koulikoro, Mali). El caudal hidrológico disminuye 60% cuando la pluviometría disminuye 30% (de acuerdo a Andersen *et al.*, 2005)

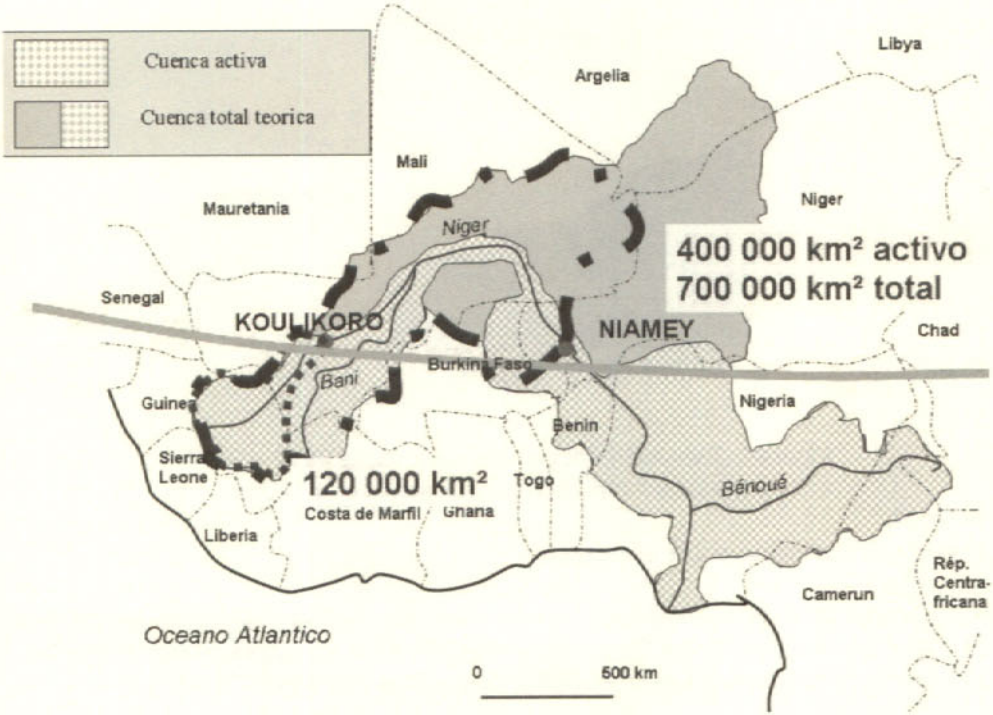


Figura 4. Localización de la cuenca del río Níger en África occidental y de las estaciones de aforo de Koulikoro y de Niamey. La línea azul representa la isoyeta de 700 mm al sur de la cual llueve más.

Este aumento obviamente no puede explicarse por la pluviometría que disminuyó durante ese periodo; la explicación se encontró en la superficie del suelo que produjo cambios en los procesos hidrológicos básicos de la región. Desde el inicio de la sequía se noto la pérdida paulatina de la vegetación natural leñosa en beneficio de las áreas de pastizal de cultivo y de barbecho (Figura 5). Al mismo tiempo, se observó en la mayor parte de las cuencas sedimentarias de la región Subsahariana un aumento del nivel medio del manto freático y últimamente una aceleración de este aumento (Descroix *et al.*, 2009). Se pudo comprobar que esto se debía al endorreísmo local que causa una acumulación de los volúmenes de agua escurridos y almacenados en lagunas temporales durante la temporada de lluvias; el número, tamaño, volumen y duración de estas lagunas aumentó mucho en las últimas décadas y son conocidas como las principales zonas de recarga del acuífero. Este tipo de evolución se registró también en Australia (Bari *et al.*, 2005).

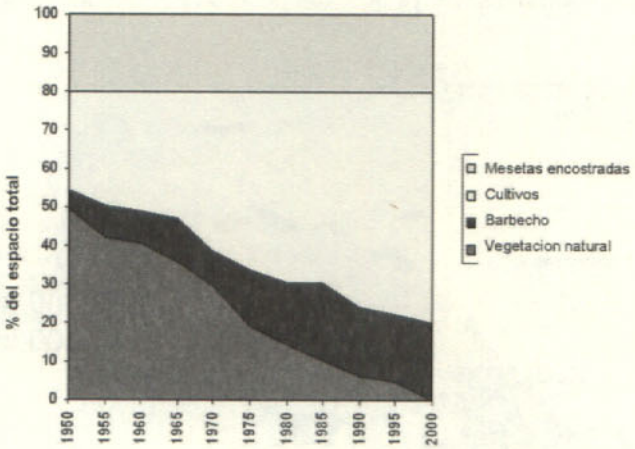


Figura 5. Evolución del uso del suelo entre 1950 y 2000 en la parte occidental de Níger (Descroix *et al.*, 2009)

Cómo el hombre influye sobre el recurso

En la década de 1990 el cambio de uso de suelo modificó el régimen de escurrimiento hidrológico en la Sierra Madre Occidental mexicana a los siguientes niveles y escalas de observación (Viramontes y Descroix, 2002; Viramontes y Descroix, 2003):

A escala de parcela y de cuenca vertiente (de un centenar de metros cuadrados a un millar de metros cuadrados) se notó una disminución de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (resultados del modelo Nazasm).

A nivel de sub-cuenca hidrológica (varios millares de kilómetros cuadrados) se observó

una disminución del tiempo de respuesta hidrológica de la década de 1970 a la década de 1990: 2% en la sub-cuenca del río Ramos con 7130 km² y 6% en la sub-cuenca del río Sextín de 4660 km².

A nivel de sub-cuencas hubo una disminución de la proporción del escurrimiento de base en beneficio del escurrimiento de avenida (Figura 6).

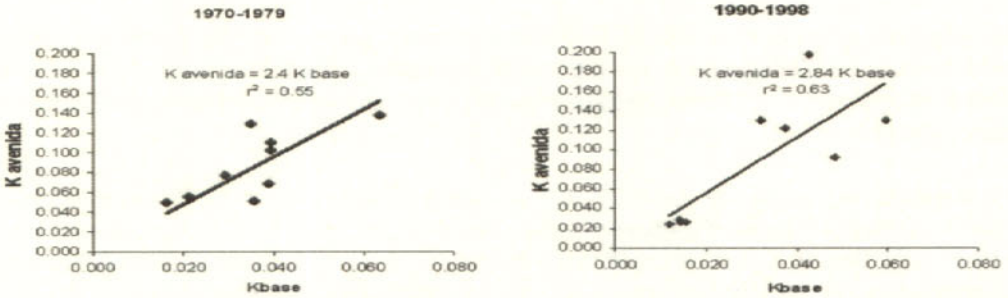


Figura 6. Evolución de la relación entre escurrimiento de avenida y escurrimiento base en la sub-cuenca hidrológica del río Ramos (cuenca alta del Río Nazas)

Más indirectamente, los cambios de uso del suelo tienen impactos sobre el clima, al modificar el albedo, la rugosidad de la superficie terrestre, así como su potencial de evaporación y su contenido en agua (humedad del suelo). El programa científico Análisis Multidisciplinario de la Monzón Africana (AMMA) se dedica a estudiar las retro-acciones de la superficie terrestre con la atmósfera y el clima. Uno de los retos es demostrar si el desmonte y los cambios de uso del suelo en general pueden influir en el clima.

Conflictos frente al recurso agua

Los conflictos por el agua entre regiones pueden ser internacionales o dentro de un mismo país. Todos los conflictos son exacerbados por el riesgo de escasez hídrica y por el cambio climático que hace aumentar su frecuencia. Se admite que el nivel de penuria hídrica es de 500 m³/ habitante/año. En el año 2000 la población de los países que estaba por abajo de este rango era de 80 millones de habitantes en países del Medio Oriente y del Golfo Pérsico como: Jordania, Israel, Arabia Saudita, Kuwait, Qatar, Bahréin y Yemen; en países de África del norte como: Libia y Túnez; en países insulares como Barbados, Malta; y en países asiáticos como Singapur (Mutin, 2000). Sin embargo esa cifra estará cerca de los 350 millones de habitantes en 2025.

Actualmente más de 100 millones de habitantes viven en países donde la totalidad del agua natural renovable está comprometida; es decir que aunque no hubiera cambio climático tendrían escasez de agua por el aumento de la población. En las próximas décadas, los cambios de origen humano tendrán mayor impacto en el recurso agua que el cambio climático. Por esta razón, conviene más hablar de cambio global que únicamente de cambio climático.

Los conflictos de tipo social pueden ser debido al uso, al acceso o a problemas de calidad. Pueden ocurrir a toda escala, desde la escala local hasta la escala mundial.
En la Sierra Madre Occidental mexicana (Estado de Durango) se originaron dos conflictos por el acceso al agua derivados del cambio de uso de suelo que provocó un deterioro de los suelos y una disminución acelerada de su capacidad de almacenamiento hídrico. Los dos conflictos dieron lugar a proyectos de solución que no han sido ejecutados por inviabilidad social y política (Lasserre y Descroix, 2005):

El ejido Boleras, en el municipio de Guanaceví Durango, quiso captar las aguas del arroyo perenne llamado "Ciénega de la Vaca" para uso domestico y productivo, pero eso le hubiera quitado el agua al ejido La Peña que es propietario de los terrenos donde nace el manantial que da origen al arroyo.

En el estado de Durango se estudió un tiempo la forma de excavar un túnel para transvasar hacia el río Nazas el agua de las cuencas altas de los ríos Humaya y San Lorenzo; sin embargo estos dos últimos alimentan las presas y los distritos de riego de la llanura costera del estado vecino de Sinaloa. Se abandonó el proyecto para no crear problemas interestatales.

En la zona semiárida del estado de Durango, cerca del poblado de Cuencamé, el sobre consumo de agua del rancho privado Atotonilco arruinó a la comunidad del ejido Ceniceros ubicada aguas abajo (Figura 7) antes de que se manifestara cualquier indicio del cambio climático. El bajo volumen de agua que le quedaba al ejido aguas abajo del rancho, disminuyó aun más durante la sequía de los años 1992 a 2005.

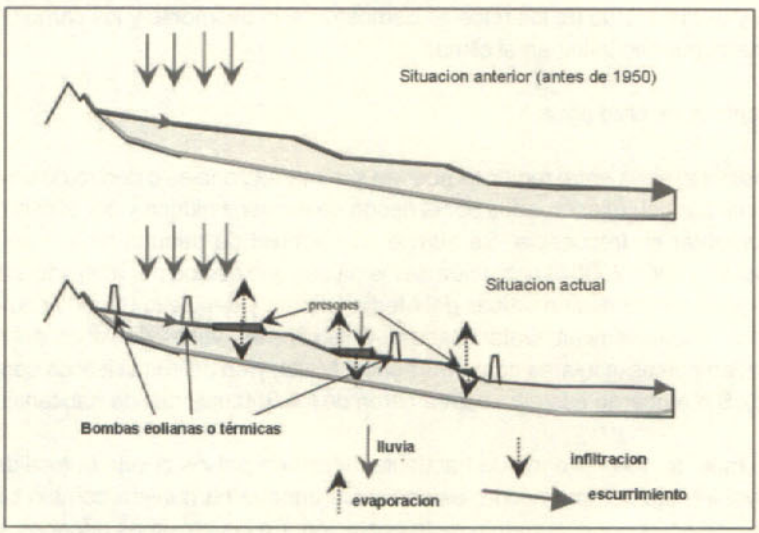


Figura 7. Funcionamiento hidrológico aguas arriba del Ejido Ceniceros (Cuencamé, Durango, México)

En México el ejemplo más conocido de conflicto por el uso de agua es el del sistema Cutzamala. Cuando se construyeron las presas en las décadas de 1930 y 1940, la urgencia era proveer de energía eléctrica a la Ciudad de México. Pero varias décadas después la urgencia se convirtió en la de proveer agua potable a sus 20 millones de habitantes. El equipo fue transformado y provee ahora 20% del consumo de la capital (Figura 8). La causa de este cambio de prioridad no tiene tampoco ninguna relación con el cambio climático. El crecimiento de la Ciudad de México impone buscar agua para uso doméstico e industrial cada vez más lejos de la ciudad.

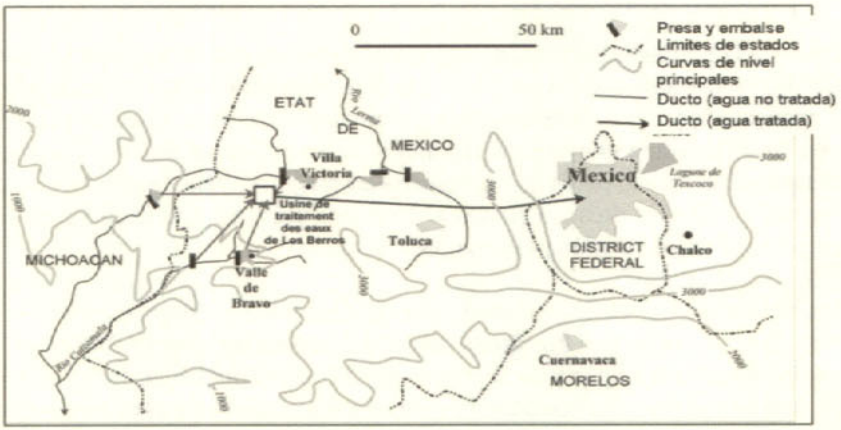


Figura 8. El sistema Cutzamala, un ejemplo de cambio de uso del agua (Descroix *et al.*, 2004)

Los problemas de calidad del agua pueden agravarse por un periodo de sequía, porque la concentración de contaminantes en el agua crece cuando baja el caudal hidrológico. Sin embargo, en el caso del río Colorado, el problema existió mucho antes de la sequía de los años noventa. Además del problema de cantidad, que se supone arreglado por los acuerdos internacionales, las aguas que llegaban a México eran aguas residuales de una zona de Arizona; por lo que se tuvo que firmar otro acuerdo para que los norteamericanos aceptaran dar tratamiento a esas aguas antes de que se escurrieran hacia el bajo río Colorado.

Existen conflictos potenciales debido a muchos otros factores, entre los que figuran los estratégicos. Hay conflictos de uso entre la ciudad y el campo como en el suroeste de EEUU o en el norte árido de México; mientras más crecen las poblaciones urbanas se les tiene que suministrar más volumen de agua para el uso doméstico e industrial; esos volúmenes provienen del agua destinada al riego agrícola que produce menos valor agregado por metro cúbico.

En un mismo país puede haber conflictos entre la cuenca alta y la cuenca baja de un río; el caso general es que en la parte baja se acostumbra usar el agua que proviene de la parte alta, hasta que un día los habitantes de la parte alta también tienen interés en usar el agua. Este aspecto conlleva la noción de *anterioridad* ya que en muchos países o territorios nuevos el

agua pertenece al primero que la aproveche.

El usuario puede estar en ambas situaciones como EEUU y México en el caso de los ríos Colorado y Bravo. Estos usos no causaban conflictos mientras la demanda (o sea la densidad de población y la actividad económica) era poca; pero en cuanto aumentó se dio la competencia por el uso y el acceso haciendo necesarios los acuerdos y leyes nacionales e internacionales. Obviamente si los conflictos suceden en un mismo país, los conflictos entre países pueden ser aún más graves y ese es el dominio de competencia de la geopolítica del agua, llamada también "hidropolítica" (Descroix y Lasserre, 2007; Lasserre y Descroix, 2005).

En los casos del río Bravo y del río Colorado evocados (Descroix *et al.*, 2004; Lasserre y Descroix, 2005) los acuerdos no resolvieron todo y hubo problemas en 2004 por el uso de las aguas del río Conchos, afluente del río Bravo, que fueron asignadas a las áreas de riego norteamericanas en Texas debido a una "deuda" hidráulica contraída por las áreas de riego mexicanas en Tamaulipas. Esto causó pérdidas de cosecha de sorgo del lado mexicano. Es común que se agraven los problemas de agua en casos de sequía pero mientras haya negociaciones los acuerdos serán la mejor solución para compartir el recurso agua.

Conflictos potenciales o latentes mucho más amenazantes y peligrosos para el equilibrio geopolítico mundial, existen en tres áreas del Medio Oriente (incluyendo Africa del Norte): los valles del río Nilo, del río Jordán y de la antigua región de Mesopotamia. Todas podrían causar conflictos graves y el riesgo crece conforme aumenta la población y conforme se manifiestan los problemas de escasez hídrica por el cambio climático (Lacoste, 2001; Mutin, 2000).

El valle del río Nilo es una de las cunas de la agricultura de riego. A pesar de tener menos del 4% de su territorio cultivable Egipto logró ser autosuficiente en cereales hasta los años 1980 en que tuvo que empezar a importar grandes volúmenes de trigo. Le eficiencia del riego se puede mejorar en este país, pero lo más probable es que tendrá que seguir importando mucha *agua virtual* bajo la forma de cereales que no se producen en el país. Egipto depende en 97% de las aguas del río Nilo que provienen de áreas muy alejadas. La Iniciativa de la Cuenca del Río Nilo (Nile Basin Initiative NBI), creada en 1981, logra por el momento mantener un equilibrio entre Egipto, que durante mucho tiempo pudo usar toda el agua del río Nilo y los países situados aguas arriba que pretenden usar más agua en el futuro para uso agrícola. Etiopia tiene 80 millones de habitantes, Sudán 36 millones y ambos tienen extensas zonas áridas que podrían aprovechar las aguas del río Nilo mediante la instalación de áreas de riego. Los países localizados más arriba ya son del área ecuatorial, pero dos tienen fuertes densidades de población (Ruanda y Burundi) y también podrían tener algún día proyectos hidrológicos. La cuenca del río Nilo, de 3 millones de km² cubre parte de 10 países diferentes.
Egipto sabe que nunca podrá disponer más del volumen actual escurrido. Más bien irá disminuyendo debido al muy probable consumo de los otros países situados aguas arriba. Como Egipto ya consume la totalidad del agua del río Nilo (el cual virtualmente ya no vierte agua al Mediterráneo) y que su población está creciendo (a 1.7% por año planeado para el periodo 2005-2015), la única fuente de agua suplementaria que va a disponer es la que ahorre por optimización de

uso. También podría contar con la desalinización del agua del mar (lo que ya hace a orillas del Mar Rojo) pero Egipto no tiene reservas de petróleo importantes como para pagar ese tipo de inversión a gran escala como lo hacen los Emiratos árabes en el Golfo Pérsico.

La pequeña cuenca del río Jordán (42,800 km²) es otro caso típico de estudio geopolítico o "hidropolítico". Desde la década de 1940 un conflicto latente entre poblaciones árabes y judías dificulta el manejo del agua y exagera los problemas para planear el manejo. Actualmente tres de los cinco países de la cuenca (Jordania, Israel y Palestina) están bajo estrés hídrico con menos de 500 m³ de agua al año por habitante. De acuerdo a los pronósticos presentados en el cuadro 1, en 2025, Siria también estará en la misma situación y Líbano lo estará antes del 2050 (De Villiers, 1999; Mutin, 2000; Lasserre y Descroix, 2005).

Tabla 1. Población y disponibilidad de agua por habitante en los países de la cuenca del río Jordán (de acuerdo a Mutin, 2000 y De Villiers, 1999)

País	recurso agua total km³	población 1995 (*10³)	m³ de agua/hab 1995	población 2025 (*10³)	m³ de agua /hab 2025
Palestina	0.72	2700	267	6000	120
Jordania	1.1	4400	250	9000	122
Israel	2.15	5523	389	7977	270
Líbano	3.9	3900	1000	6000	650
Siria	14.2	15000	947	34000	417

Este es uno de los casos más recientes en que el recurso agua origina un conflicto armado; en 1959 Israel bombardeó la rivera oriental del río Jordán donde Jordania estaba construyendo un canal para aprovechar las aguas del río. Desde entonces *la razón del más fuerte ha sido la mejor* (Jean de La Fontaine) así Israel, después de invadir el territorio de Gaza y Cisjordania en 1967 y la meseta del Golán en 1973, prohibió a la población palestina de Cisjordania extraer agua subterránea a mas de 10 metros de profundidad y captó gran parte (75%) de las aguas del manto freático de esta región para su propio uso (riego, uso doméstico e industrial). Actualmente Israel toma el 57% del agua que necesita, fuera de sus fronteras internacionales reconocidas por la ONU: 40% provienen del acuífero de Cisjordania y 60% del río Jordán.

Es evidente que la situación de escasez de agua exacerba los demás problemas geopolíticos de esta área. Sin embargo, como ya bajaron mucho los precios de la desalinización del agua de mar (menos de 0.5 USD por m³), se relativizan los problemas hídricos. Con 12500 millones de dólares de inversión, se podría alimentar a la población de los 3 países más estresados (Jordania, Palestina e Israel); esto representa menos del 3% de los costos de la guerra del Golfo Pérsico que pagaron los países aliados en 1990-1991; el costo anual de funcionamiento de las desalinizadoras sería inferior al 2% del presupuesto militar anual de los 3 países beneficiados (Lasserre y Descroix, 2005). En estas condiciones, hoy día se puede decir que el control del agua no es más que un pretexto para mantener posiciones bélicas en los famosos territorios ocupados.

En la antigua región de Mesopotamia, Turquía, aprovecha su posición dominante al tener dentro de su territorio los manantiales que dan origen a los dos grandes ríos de esa cuna de la civilización: los ríos Tigris y Eufrates (Postel, 1999). Para desarrollar la parte oriental del país, el estado turco inició el gran proyecto de Anatolia (Great Anatolian Project GAP) que planea la construcción de 17 presas en el río Eufrates de las cuales 8 ya se construyeron con una capacidad de almacenamiento de 90 mil millones de m^3. (Lasserre y Descroix, 2005); así como 8 presas en el río Tigris de las cuales 4 ya se construyeron con una capacidad de almacenamiento de 15 mil millones de m^3. En esta parte oriental de Turquía se desarrolla también el movimiento rebelde kurdo (PKK) desde la década de 1960. Como la cuestión del agua no se puede disociar de la dimensión política regional, Siria intenta armar a los kurdos contra Ankara para tener elementos de contrapeso a su posición de fuerza con las aguas de los ríos. Aguas ms abajo, Irak depende también de Turquía y de Siria para obtener agua del Tigris y del Eufrates; y ya sufrió al principio de los años 2000 un estiaje total del río Eufrates porque Siria bloqueó en la presa de Taqba la poca agua que Turquía dejaba escurrir; así Irak apoya a Ankara en su lucha contra el movimiento rebelde kurdo (Béthemont, 2000; Lasserre y Descroix, 2005).

Afortunadamente pocas áreas del planeta tienen esas complejidades geopolíticas, por lo general los acuerdos bilaterales o multilaterales y el desarrollo de la política de manejo por cuenca han podido ser modelos del manejo diplomático entre naciones que tienen relaciones difíciles. Es importante notar por ejemplo que la mayor y tal vez la más antigua zona de riego agrícola del planeta, el valle del río Indus, es compartida por dos países que tienen conflictos armados graves casi cada 10 años. Sin embargo, nunca se ha interrumpido la cooperación hidráulica y nunca se han bombardeado las obras hidráulicas. Tendrá el manejo del agua virtudes pacifistas y humanitarias? Lo mismo ocurrió entre Senegal y Mauritania cuando en 1989 rompieron sus relaciones diplomáticas después de un conflicto local entre ganaderos y agricultores que degeneró en un caos con miles de muertos en las dos capitales (Dakar y Nuakchot respectivamente). Sin embargo la Organización de manejo de la cuenca del río Senegal (OMVS) nunca dejó de trabajar y los acuerdos para el manejo del agua siguieron vigentes durante los años en que no hubo relaciones diplomáticas entre los dos países hasta que finalmente se reanudaron gracias a ella (Béthemont, 2001; Lasserre y Descroix, 2005; Descroix, 2009).

En todos estos casos citados hasta aquí el factor humano (crecimiento de la demanda de agua debido al crecimiento demográfico y al mejoramiento del nivel de vida) ejerce una presión muy superior a la de cualquier cambio climático. Los cambios de uso del suelo debidos por lo general a la presión demográfica, explican los cambios en el régimen de los ríos.

Acuerdos y manejo del agua

En las últimas décadas se han firmado un gran número de acuerdos binacionales o internacionales y se han constituido muchas agencias de cuenca con la motivación inicial de evitar

conflictos en base al derecho internacional, sin embargo no existe aún una organización con reconocimiento mundial dedicada al agua. (Lasserre y Descroix, 2005; Pearce, 2006). De las 286 cuencas transfronterizas en el mundo ya un cierto número de ellas tienen constituidas agencias o autoridades de manejo común. Por lo general, son más fáciles de armar cuando son solo dos países que tienen cada cual una orilla del río, como EEUU y México con el río Bravo o Alemania y Francia con el río Rin. Mientras más países compartan una cuenca común, mayor será la dificultad para lograr acuerdos. Ciertas agencias no lograron reunir a todos los países de la cuenca y a veces faltaba el país que tenia los manantiales o la fuente del recurso agua; tal es el caso de China que no quiso pertenecer a la Comisión de la cuenca del río Mekong (CBM); y de Guinea que no quiso pertenecer a la Organización de manejo de la cuenca del río Senegal (OMVS).

Desde hace 20 años más o menos, se han propuesto varios tipos de manejo del recurso agua (Burton citado por Lasserre y Descroix, 2005; Calder, 2005; Molle, 2006): el manejo por cuenca, el modelo ecosistémico, el manejo integral por cuenca y el manejo integral del recurso agua (MIRA). Este último tipo de manejo tiene tres fundamentos principales:
1. El conocimiento. El manejo integral requiere que se conozcan los recursos hídricos en términos de cantidad y calidad; los usos que ya existen y las características de los ecosistemas en los que coexisten los procesos naturales y las actividades humanas. Es importante agregar todo el conocimiento científico y técnico que exista sobre la cuenca, sin olvidar los conocimientos tradicionales y populares.

2. La cooperación. El MIRA debe incluir a todos los usuarios de las aguas y del territorio de la cuenca. Según el Consejo Mundial del Agua (2000) el reto es promover la cooperación pacífica y desarrollar sinergias entre los usos y entre los usuarios del agua. El freno a este tipo de manejo es la persistencia de fuerzas conservadoras que no aceptan ningún tipo de acción colectiva.

3. La participación del público. Los usuarios son todos bienvenidos en este concepto pero no exclusivamente la "sociedad civil" sino los que usan el agua para todo tipo de actividad: agrícola, doméstica, industrial, recreativa, transporte, pesca, refrigeración. La participación del público desempeña un papel importante en la planificación y la definición de políticas de manejo; para ello también es importante que el público esté bien informado; el manejo debe garantizar la transmisión de la información en los dos sentidos: de la autoridad hacia el público y viceversa.

La primera condición para que el manejo se haga con éxito es el establecimiento de la confianza entre países o usuarios, de esto depende que se firmen los acuerdos internacionales y que se constituyan las agencias de cuenca. Lo importante es que haya voluntad, conocimiento, participación del público y que se aprovechen los conocimientos existentes. También puede añadirse que el manejo del recurso agua, de cualquier modelo o tipo sea, debe hoy día tomar en cuenta el cambio global (climático o de origen humano) para adaptarse a la evolución del recurso hídrico.

El Manejo integral del recurso agua (MIRA) es una de las vías más prometedoras para las

sociedades que quieran manejar su territorio y sus recursos hídricos, sin embargo, no es la única vía ni pretende serlo (Descroix, 2009). De hecho, existe actualmente un debate sobre el MIRA ya que varios países adoptaron este tipo de manejo a partir de las experiencias francesa e inglesa pero hay un movimiento internacional que desea acabar con la "dictadura del MIRA"; esto incluye el manejo por cuenca vertiente y las asambleas de usuarios (Warner *et al.*, 2008). Efectivamente, el MIRA y sus "anexos" tienen muchos ejemplos que funcionan bien y las organizaciones internacionales o los organismos financieros imponen a menudo este tipo de manejo como condición previa al otorgamiento de un préstamo o un financiamiento. Los especialistas de países "nuevos" del área anglo-sajona, como los sudafricanos, los canadienses o los australianos temen ver aparecer estructuras que impongan un gran peso adicional al poder administrativo central de su país.

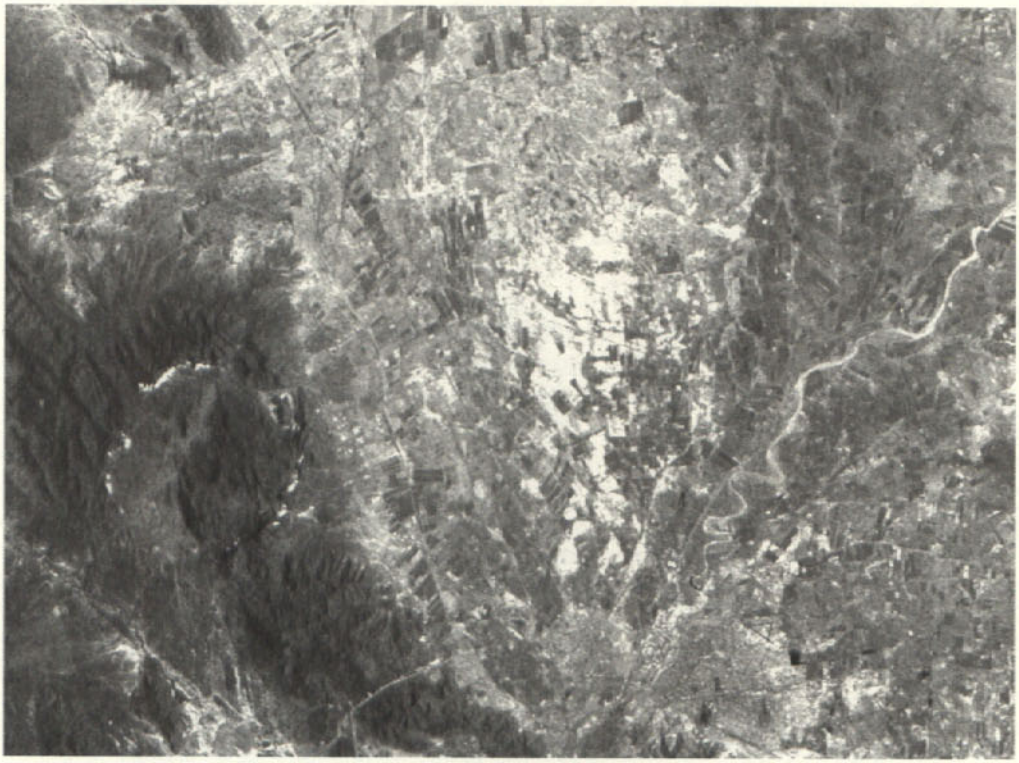


Figura 9. Salinización secundaria de suelos arcillosos por aguas de riego de mala calidad en la Comarca Lagunera Mexicana. Este proceso de degradación por mal manejo del agua y del suelo llevó 40 años aproximadamente (González-Barrios, 1992) mientras que civilizaciones como Hohokam y Tehuacán llevan más de mil años de riego sin alterar la calidad del suelo.

Conclusiones

El cambio global, suma de los efectos del cambio climático y del cambio antropogénico (debido sobre todo al uso del suelo) no es la mayor amenaza que pesa sobre el recurso agua para los próximos años o décadas. El crecimiento de la población y las necesidades de agua *per capita* disminuyen mucho más rápidamente el volumen disponible por habitante. A veces errores en el manejo del agua y del suelo provocan pérdidas de cosechas y pérdidas de la calidad del suelo. En la Comarca Lagunera mexicana por ejemplo, un mal manejo de las aguas de riego en suelos arcillosos mal drenados provocó la salinización secundaria con repercusiones productivas importantes (González-Barrios, 1992). La Figura 9 muestra las manchas blancas del suelo salinizado por aguas de riego de mala calidad. Sin embargo los factores humanos del cambio global (actividades económicas y la degradación de los espacios naturales) se pueden corregir como se está haciendo en muchas partes del mundo para disminuir todos los tipos de contaminación. Esto es primordial a largo plazo, pues el cambio global tendrá un impacto en la disponibilidad del recurso agua de algunas regiones del mundo que pudiera exacerbar las tensiones y conflictos latentes. Por el momento, muchas medidas permiten limitar el crecimiento de la demanda de agua, bajo la condición de que haya un consenso en acuerdos o planes de manejo integral. El mejoramiento de la productividad hidráulica y la lucha contra las pérdidas por conducción o en los cultivos, el cambio hacia procesos industriales más limpios y menos consumidores de agua, la educación del público para gastar lo menos posible de agua en el uso doméstico, constituyen una fuente de ahorro hídrico muy importante. Pero la participación del público en las decisiones es la contraparte democrática indispensable para que la toma de consciencia de la sociedad civil sea eficaz. Esto hará más fácil la aplicación de medidas destinadas a luchar contra el cambio global y sus consecuencias en términos de recurso hídrico.

Literatura citada

Andersen, I., Dione, O., Jarosewich-Holder, M., Olivry, J.C., 2005. *The Niger River Basin: a vision for sustainable management.* The World Bank, Washington, DC, the USA; Directions in developmment, K.G. Golitzen Ed.145 p.

Bari, M.A., Smetten, K.R.J., Sivapalan, M., 2005. Understanding changes in annual runoff following land use changes: a systematic data-based approach. *Hydrological Processes*, 19: 2463-2479.

Besnier, A-L, Descroix, L, Nazoumou, Y., 2006. La gestion de l'eau dans le bassin du Niger: sur la voie d'une gestion plus concertée; (*manejo del agua en la cuenca del río Niger : hacia un manejo concertado*) « Politique de l'eau ; grands principes et réalités locales » ed. F. Lasserre et A. Brun. Ch.11, Québec, pp 275-301.

Béthemont, J., 2001. Ressources en eau et territoire hydraulique. (*recursos en agua y territorio hidráulico*); Revue de l'Economie Méridionale, vol 49, n°194-195, 123-132.

Béthemont, J., 2000. Les grands fleuves. Armand Colin, Paris, 254 p.

Calder, Ian, 2005: Blue revolution: integrated land and water resource management, Second edition, Earthcan, London Sterling, 352 p (significantly increased according to the first edition).

CNRS-DRH Formation, 2000. Les conflits d'usage en environnement, le cas de l'eau. (*los conflictos de usos en el medio ambiente, el caso del agua*) . Actas de la Escuela de Física de Les Houches, 253 p.

Consejo Mundial del Agua (Conseil Mondial de l'Eau), 2000. Final report. Second World Water Forum and Ministerial Conference, La Haya, Paises Bajos.

Descroix, L. et Lasserre, F., 2007. Or bleu et grands ensembles économiques: une redéfinition en cours des rapports de force interétatiques?.(*oro azul y grandes conjuntos económicos: una redefinición en curso de los equilibrios inter-estatales*) *La Revue Internationale et Stratégique*, 66 : 93-104.

Descroix, L., Gonzalez Barrios, J.L., Estrada, J. (Eds), 2004. La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Ediciones INIFAP-IRD, Gómez Palacio, Mexico, 300 p.

Descroix, L., 2009. L'inévitabilité et l'à propos du choix du bassin versant comme unité de gestion dans les contextes africains. (*la invevitabilidad y el propósito de escoger la cuenca hidrográfica como unidad de manejo en el contexto africano*). In: La gestion intégrée des ressources en eau en Afrique sub-saharienne. En prensa, Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada.

Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., G., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., Olivry, J-C., Albergel, J., Amogu, O., Cappelaere, B., Dessouassi, R., Diedhiou, A., Le Breton, E., Mamadou, I. Sighomnou, D., 2009. Spatio-Temporal Variability of Hydrological Regimes Around the Boundaries between Sahelian and Sudanian Areas of West Africa: A Synthesis. Journal of Hydrology, AMMA special issue. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.012

De Villiers, M., 1999: Water. Stoddard Publishing, Toronto, 415 p.

González-Barrios, J.L., 1992. Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine ; exemple dans la Comarca Lagunera. Thèse Doctorat, Université de Montpellier II, France, 316p

Hulme M., 1998. The change in high summer total ptecipitation estimated from land surface records. Climate Research Unit. University of East Anglia, Norwich, United Kingdom

Lacoste, Y., 2001. Géopolitique de l'Eau. Hérodote, N° 102: 3-18.

Lasserre, F. y Descroix, L. (sous la direction de), 2005: Eaux et territoires. (*Aguas y territorios*). Presses Universitaires du Québec, collection Géographie contemporaine, 350 p.

Manière de voir, 2002. La ruée vers l'eau. (*la carrera hacia el agua*). Número especial septiembre-octubre 2002.

Margat, J., 2000. L'eau, enjeu de conflits. (*el agua, objeto de conflictos*). Revue des deux mondes, pp. 33-37.

Molle, François, 2006. Planning and managing water resources at the river-basin level: emergence and evolution of a concept. Research report #16, comprehensive assessment of water management in agriculture; IWMI IRD CGIAR. (on the Web), 28 pp., Columbo, Sri Lanka.

Monde Diplomatique, 2009. Bataille pour l'eau. (*Batalla por el agua*) In: L'Atlas, un monde à l'envers. p. 26-27.

Mutin, G., 2000. L'eau dans le monde Arabe. (*el agua en el mundo árabe*) Ellipses, carrefours de géographie. Paris, 156 p.

Orsenna, Erik, 2008: L'avenir de l'eau. *(el futuro del agua)* Fayard, Paris, 450 p

Pearce, F., 2006; Quand meurent les grands fleuves; enquête sur la crise mondiale de l'eau. (*Cuando mueren los grandes ríos; encuesta sobre la crisis mundial del agua*); Calmann Lévy, Paris, 435 p.

Postel, Sandra, 1999: Pillar of sands; can the irrigation miracle last ? World Watch books Norton & Company, New York London, 313 p.

Pour la Science, 2008. L'eau, attention, fragile ! (*el agua:cuidado, frágil* !). Edición francesa de Scientific American. Enero de 2008.

Pourtier, R. (2003). L'Afrique centrale dans la tourmente: les enjeux de la guerre et de la paix au Congo et alentour. *Hérodote*, n°111, p. 11-39.

Sciences et Vie, 2000. Menaces sur l'eau. (*amenazas sobre el agua*). Número especial n°211, 160 p.

Viramontes, D. y Descroix, L., 2002. Modifications physiques du milieu et conséquences sur le comportement hydrologique des cours d'eau de la Sierra Madre Occidentale (Mexique). *Revue des Sciences de l'Eau*, 15/2: 493-513.

Viramontes, D. y Descroix, L., 2003 Variability of overland flow in an endoreic basin of northern Mexico: the hydrological consequences of environment degradation. *Hydrological Processes*,

17:1291-1306.

Warner, J., P. Wester et A. Bolding (2008). Going with the flow: river basins as the natural units for water management ? *Water Policy*, Vol 10, n° S2 p. 121–138 IWA Publishing 2008 doi:10.2166/wp.2008.210.

Wittfogel, K.A., 1957. Oriental despotism. A comparative study of total power. New York, Vintage Books/Random House.

El libro científico

Manejo comparado de cuencas hidrológicas
Incertidumbre climática, vulnerabilidad ecológica y conflicto social

Se terminó de imprimir en el mes de enero de 2010
en los talleres Carmona Impresores S.A. de C.V. de Torreón, Coahuila.
Su tiraje consta de 1000 ejemplares

Impreso y hecho en México

ISBN: 978-607-95106-4-0