

inifap

Fundamentos para el aprovechamiento integral del agua

una aproximación de simulación de procesos

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

**CENID-RASPA
Libro Científico No. 2**

Fundamentos para el Aprovechamiento Integral del Agua

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Editores Técnicos:

Rodolfo Jasso Ibarra

José Villanueva Díaz (SNI)

Ignacio Orona Castillo (SNI)

Magdalena Villa Castorena (SNI)

Guillermo González Cervantes (SNI)

José Luis González Barrios (SNI)

José Antonio Cueto Wong (SNI)

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

SAGARPA – INIFAP – CENID RASPA

Libro Científico No 2

Primera Edición Abril 2005

IMPRESO Y HECHO EN MEXICO

CENID RASPA

Km. 6.5 margen derecha Canal Sacramento

Gómez Palacio, Durango, MEXICO

Tels.: (871) 7 19 10 76, 7 19 10 77, 7 19 11 34

Imagen en Portada:

Campo Agropecuario en Zona Semiarida de Zacatecas

Foto: Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Diseño de Portada y Pre prensa

Ignacio Sánchez Cohen

Beatriz Ileana Martínez Román

Cita Correcta:

Sánchez-Cohen, I. 2005. Fundamentos para el Manejo Integral del agua. Libro Científico No. 2. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera. Gómez Palacio Durango, México. 272 p.

©Derechos Reservados

ISBN 968-800-614-9

La presentación y disposición en conjunto de «Fundamentos para el Manejo Integral del Agua», son propiedad del autor la SAGARPA y el INIFAP CENID RASPA. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema o método electrónico, mecánico (incluyendo fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito del autor.

A SAUL

Tu silenciosa enseñanza



Prólogo

El crecimiento poblacional y el aumento en la demanda de agua entre los distintos sectores de la sociedad han sometido a una presión severa a las reservas de agua del planeta. En algunos países la competencia por la disponibilidad de este recurso ha obligado a una reducción del área irrigada para derivar agua hacia las ciudades. En este contexto, la investigación sobre el recurso ha enfocado el esfuerzo a la solución de problemas a nivel parcelario, asumiendo que el origen del problema son las bajas eficiencias de riego. Sin embargo, bastante evidencia denota que el incremento en la eficiencia global del riego no resolverá el problema de disponibilidad en el largo plazo a no ser que los ahorros por concepto de incremento en la eficiencia se utilicen en las áreas urbanas y otros sectores productivos.

Se trata de incorporar en los organismos operadores y normativos de los recursos naturales una visión de manejo integral en la que se consideren los componentes y variables de decisión del ciclo hidrológico de las cuencas. De esta manera, la planeación multi objetivo es herramienta fundamental para la conciliación de los diversos intereses que a ese nivel compiten. En algunos lugares de México, el gran porcentaje de la población en las distintas regiones hidrológicas (considerando la división de la Comisión Nacional del Agua) vive en las planicies, en donde se ubican los distritos de riego, y solo un reducido porcentaje en las partes altas en donde se generan los escurrimientos que alimentan a los embalses. Es ahí en donde las alteraciones al ecosistema repercuten invariablemente en la población aguas abajo del sistema.

En este sentido, la presente obra tiene como objetivo proveer de las herramientas fundamentales a operadores, técnicos, investigadores y público en general para la generación y tratado de información que permita la solución de problemas de gran impacto considerando a la cuenca hidrológica como la unidad básica de la planeación de las cadenas productivas. Se incorpora un enfoque de simulación de procesos hidrológicos y se presenta una aproximación del tratado de los problemas utilizando Sistemas Computacionales para el Auxilio en la Toma de Decisiones (DSS). Se incluye además los códigos fuente de programas computacionales para facilitar la cuantificación de variables de decisión.

Dr. Pedro Brajcich Gallegos
Director General del INIFAP

INDICE

PRÓLOGO

I	El agua origen y amenazas	1
II	Disponibilidad del Recurso	13
III	Acciones e Impacto	31
IV	Uso Potencial	47
V	Simulación de Procesos	69
VI	Incertidumbre Climática y análisis de Riesgo	105
VII	Análisis de sensibilidad en Modelos de Simulación ...	125

VIII	Sistemas de Captación de Agua de Lluvia	135
IX	La Aproximación por Cuencas	161
X	Sistemas de Ayuda en la Toma de Decisiones	179
XI	¿Hacia una Cultura del Agua?	191

ANEXOS

I	Consideraciones Generales en el Manejo del Agua	205
II	Tablas de Conversión	227
III	Códigos Fuente de Programas Computacionales	231
IV	Manual del DSS	247
	Referencias Bibliograficas	261

Capítulo I

El Agua, origen y amenazas

Las teorías del origen de la vida se fundamentan en dos grandes vertientes: el idealismo y el materialismo. La primera, se limita a contemplar pasivamente la naturaleza viva descansando más en la espiritualidad que en el raciocinio mientras que la segunda, trata de explicar la forma en que se estructuró la materia para dar origen a los seres vivos. Este punto ha sido y es objeto de tratados específicos por renombrados científicos que haciendo uso de observaciones y mediciones espaciales, han postulado teorías y leyes y en algunos casos han inventado métodos de análisis, para encontrar respuesta a la interrogante del origen de la vida.

El llamado «fundamento científico» de la filosofía materialista es la teoría de la evolución, a la que se refieren innumerables trabajos científicos desde que Charles Darwin publicara su obra en 1859. Ante diferentes hallazgos y análisis posteriores a esa época, la ciencia moderna ha invalidado algunos aspectos de ésta con argumentos que cuestionan el azar y mutaciones a los que Darwin relega mucho de las explicaciones en sus trabajos (Harun, 2004).

Lo anterior adquiere relevancia si se acepta que es difícil anticipar el estado que guardará nuestro planeta en relación a sus recursos naturales, sin tener al menos una perspectiva histórica de éstos en términos de su origen, composición y uso.

Así, sin pérdida de generalidad se puede asentar que el deterioro de estos recursos obedece a dos causas la natural y la inducida. La primera es acorde al orden que los diferentes elementos han ejercido en el ciclo de la vida en la que, el agua es el elemento vector y rector de todos los procesos de los seres vivos. A partir de la época de la industrialización, el hombre ha sido el principal causante del deterioro acelerado de la atmósfera con impactos graves en los ecosistemas a los que se circunscribe la vida (De Souza, *et al*/2001).

1.1 El origen.

El universo se encuentra a unos 15,000 millones de años de su origen, el Big Bang, habiéndose determinado que la edad de la tierra es de 4,600 millones de años. Los primeros seres dependientes del oxígeno aparecieron sobre la faz de la tierra hace mil millones de años; los vertebrados datan su origen hace 400 millones de años. Los insectos aparecieron hace 300 millones de años, los dinosaurios hace 200 millones junto con los primeros mamíferos. Los animales de "sangre caliente" tienen su origen en las aves que aparecieron hace 150 millones de años (Peebles *et al.* 1994.)

Los seres humanos somos una de las 50,000 millones de especies que han evolucionado (el término «evolución» está estrechamente relacionado con la teoría de Charles Darwin) en el planeta con un crecimiento exponencial que ha permitido que al año 2003 habitemos poco más de 6000 millones de personas de hecho, al 7 de enero del 2005, se estimaba que los habitantes del planeta sumaban 6, 446, 131, 400 (U.C.C.B, 2005). Para el caso de México, al 2005 se estima una población de 106, 960,000 personas ver Figura 1.1.

Diversos trabajos científicos apuntan hacia el hecho de que el agua llegó de fuera de la tierra a través de numerosos impactos por asteroides y meteoritos que traían consigo los componentes esenciales de este líquido y en forma de hielo. Mediante explosiones masivas, gases fueron liberados hacia una atmósfera compuesta por bióxido de carbono, nitrógeno, vapor de agua y otros gases. Cuando cesaron los impactos y la tierra empezó a enfriarse, el vapor de agua se condensó y se dio origen al primer océano (Klaus 1988, Kandel 1998, Prager y Earle 2001, Pizzarelo 2004). En este proceso, el sol fue el catalizador de diversas reacciones químicas, como lo ha sido y será en la historia del planeta también en las reacciones bioquímicas. En estos inicios, el contenido de oxígeno en la atmósfera era insignificante o nulo por lo que la vida, como se conoce ahora, no era posible.

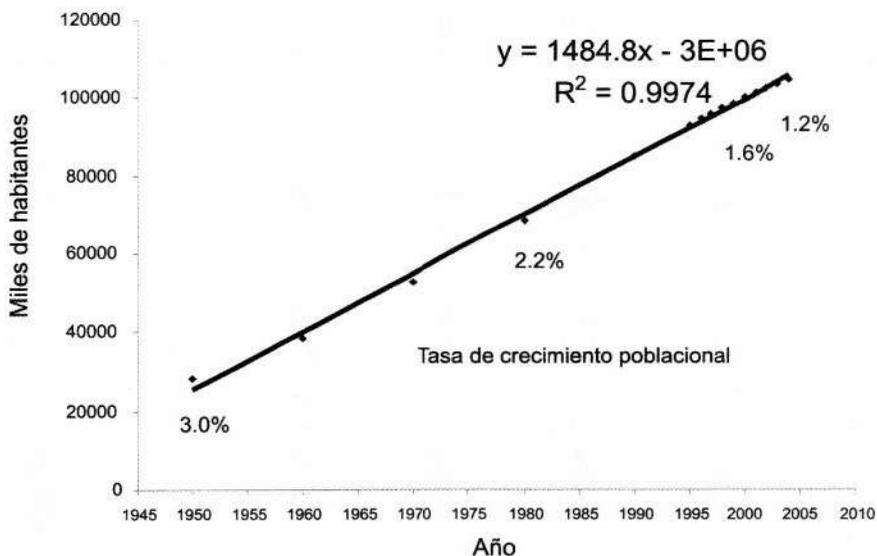


Figura 1.1: Proyección y tasas del crecimiento poblacional en México.

Como se comentó líneas arriba, el sustento de las teorías del origen de la vida es la evolución cuyo paradigma es la teoría de Darwin; sin embargo, han emergido nuevas teorías que critican el trabajo de Darwin con argumentos basados en hallazgos fósiles, en la debilidad de los actuales métodos para el fechado de material antiguo y en los análisis de probabilidades de las mutaciones azarosas a las que Darwin se refiere en su obra. A pesar de esto y aceptando la teoría de la evolución como cierta, a continuación se describe, acorde a diversos autores, como debió ser el proceso evolutivo para dar origen al actual modo de vida en el planeta.

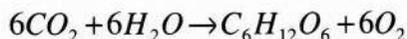
El proceso evolutivo de seres vivos simples dio estructura a los seres complejos que habitamos hoy el planeta tierra; es decir, las plantas y animales de la actualidad, en su gran mayoría, distan mucho de tener el fenotipo (características distinguibles a la vista) de sus antecesores. Sin embargo, acorde a la teoría Mendeliana, los caracteres de la herencia genética se conservan precisamente en los genes, quienes imprimen el sello distintivo a los seres vivos. Ahora, ¿qué le dio origen a los genes?. Este es el principal punto de debate en el tema. Sin embargo, se está de acuerdo en que el carbono aparece como elemento fundamental en las sustancias orgánicas mezclándose comúnmente con elementos como el hidrógeno y el oxígeno (estos últimos forman la molécula de agua), permitiendo la formación de hidrocarburos. Más aún, se sabe de la existencia del carbono en otras estrellas aunque en diferentes estados como en la

atmósfera de las estrellas mas calientes en donde se manifiesta en forma de átomos libres y disgregados; de hecho, se ha encontrado en los meteoritos en diferentes proporciones (Prager y Earle, 2001).

Diversos estudios señalan que el principio de la transformación de partículas en vida, se llevó a cabo en los océanos (Guerrero 1991). Así, las moléculas de las sustancias orgánicas se conformaban por un reducido número de partículas de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Sin embargo, en las aguas de los océanos, estas partículas se combinaron entre sí dando origen a moléculas más grandes y más complejas de diferentes sustancias produciéndose los componentes orgánicos que hoy conforman los seres vivos (véase Cuadro 1.1). Es un hecho probado que la combinación de sustancias orgánicas da origen a moléculas de proteínas que son las más importantes para la vida.

1.2 Papel de procesos bioquímicos en el origen de la vida.

De las teorías mas aceptadas sobre el origen de la vida, se cuenta con la de Oparín (Oparín, 1936). En esta se asienta que los primeros organismos en los océanos fueron los Heterótrofos que requirieron de material orgánico que tomaban del ambiente que los rodeaba obteniendo su energía por medio de reacciones químicas. La competencia por sobre vivencia, dio origen a organismos más eficientes en elaborar su propio alimento, los organismos Autótrofos. Para producir alimento, estos organismos se valen de dos procesos: fotosíntesis y quimiosíntesis; la primera utiliza la energía solar y el bióxido de carbono teniendo como componente esencial al agua para la producción de azúcares y oxígeno. Esto puede ser expresado mediante la siguiente reacción química:



La anterior reacción establece que las moléculas de carbono y agua se mezclan para formar azúcares liberando oxígeno. Nótese la importancia de este proceso para la vida en virtud de que siendo el CO_2 un gas nocivo para la salud humana, es tomado de la atmósfera y mediante la fotosíntesis se libera oxígeno que es el elemento esencial de la respiración. De este simple hecho se puede deducir que fotosíntesis y respiración son procesos interdependientes pero opuestos; es decir, uno no ocurriría sin el otro y los

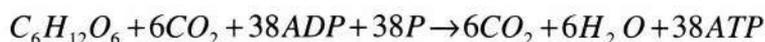
productos de uno son los insumos del otro.

En la reacción de fotosíntesis, la energía proviene de la luz solar que absorbe la clorofila, la cual es un pigmento común a los organismos que sintetizan la luz solar, esta se observa de color verde pues es el color que refleja absorbiendo los demás rayos del espectro visible. También de la reacción se produce azúcar que es una fuente de energía para cualquier organismo.

Cuadro 1.1. Contenido de agua de diversos órganos del cuerpo humano (Guerrero, 1991).

Órgano	Porcentaje
Tejido nervioso	84
Hígado	73
Músculos	77
Piel	71
Tejido conectivo	60
Tejido adiposo	30

En el proceso de respiración, la energía producida es utilizada para incrementar la temperatura de los organismos y / o para otros procesos bioquímicos; en forma sucinta, el proceso de respiración se puede expresar como:



Los productos de esta reacción son precisamente los componentes del proceso de fotosíntesis como se asentó anteriormente. En la reacción, el *ADP* es adenosina di fosfato la cual es una molécula producto de la hidrólisis del trifosfato de adenosina *ATP* de cuyo proceso se liberan grandes cantidades de energía que, es utilizada en funciones de calentamiento o para impulsar algunos procesos bioquímicos.

La quimiosíntesis es un proceso mediante el cual los organismos utilizan la energía de reacciones químicas para producir alimento. En el inicio de la vida en los mares, este debió ser un proceso importantísimo en virtud de las condiciones de anaerobiosis (carencia de oxígeno) y, en el fondo de los mares, la carencia de luz (Kandel, 2003). En el presente este es un proceso común en algunas bacterias que se desarrollan bajo estas condiciones; también, los fósiles más viejos de que se tiene información, vivieron hace 3500 millones de años en condiciones similares a las bacterias. La variación genética que permitió a algunas células usar energía lumínica para desarrollar su propio alimento, debió haber sido un proceso de selección natural iniciándose la evolución de los primeros autótrofos fotosintéticos.

1.3 Principales gases de la atmósfera y la disponibilidad del agua

Es indiscutible que la radiación solar que se aproxima a la superficie de la tierra determina por mucho las condiciones de vida y que la composición de la atmósfera condiciona la cantidad de radiación que se recibe para el desarrollo de diferentes procesos entre los que destaca la evapotranspiración (Sombroek y Gommers, 1996). Esta variable contempla los procesos de evaporación del suelo y la transpiración del reino vegetal conjuntamente; a mayor cubierta vegetal, se reduce la evaporación directa del suelo incrementándose la transpiración a través del follaje de las plantas. La reacción que condiciona la transpiración es la fotosíntesis que se discutió con anterioridad; de hecho, la eficiencia fotosintética es la variable que mejor cuantifica el intercambio gaseoso (dióxido de carbono por oxígeno) a través de las hojas de las plantas y es un indicativo de la capacidad de uso del agua en términos de generación de materia seca por unidad de agua utilizada. Este proceso es función directa de la cantidad de agua disponible en el suelo la cual a su vez es función de la precipitación.

La composición de la atmósfera ha evolucionado gradualmente en millones de años de tal manera que actualmente se compone de un grupo de gases que se pudieran considerar como “permanentes” y otro de “variables”. También esta constituida por partículas como aerosoles, agua y cristales de hielo los cuales presentan alta variación en espacio y tiempo. El cuadro 1.2 señala las concentraciones de estos gases.

Del cuadro 1.2 se puede notar que el nitrógeno, el oxígeno y el argón ocupan el 99.99% de los gases que constituyen a la atmósfera.

Estos gases son responsables de la transmisión y reflectancia de los rayos solares y definen los valores de los componentes de la distribución de la radiación solar. La tasa de absorción de rayos solares por estos gases es de suma importancia en el proceso de calentamiento de la atmósfera. Así, parte de la radiación solar es absorbida y parte regresa al espacio acorde a la siguiente expresión de balance (Sellers, 1975):

$$Q_s = R_r + M_r + R_a + M_a + (Q + q)(1 - \alpha) + (Q + q)\alpha$$

Cuadro 1.2: Gases que componen la atmósfera (Guerrero, 1991)

GASES PERMANENTES		GASES VARIABLES	
Elemento	Concentración (% por volumen)	Elemento	Concentración (% por volumen)
Nitrógeno (N_2)	78.084	Vapor de agua	0 - 0.04
Oxígeno (O_2)	20.948	Ozono (O_3)	0 - 12×10^{-4}
Argón (Ar)	0.934	Dióxido de azufre (SO_2)	0.001×10^{-4}
Dióxido de carbono (CO_2)	0.033	Dióxido de nitrógeno (NO_2)	0.001×10^{-4}
Neón (Ne)	18.18×10^{-4}	Amonio (NH_3)	0.004×10^{-4}
Helio (He)	5.24×10^{-4}	Oxido nítrico (NO)	0.0005×10^{-4}
Kriptón (Kr)	1.14×10^{-4}	Ácido sulfhídrico (H_2S)	0.00005×10^{-4}
Xenón (Xe)	0.089×10^{-4}		
Hidrógeno (H_2)	0.5×10^{-4}		
Metano (CH_4)	1.5×10^{-4}		
Oxido nítrico (N_2O)	0.27×10^{-4}		
Monóxido de carbono (CO)	0.19×10^{-4}		

La anterior expresión establece que la radiación solar en el tope de la atmósfera ($Q_s = 720$ Langleys año⁻¹) puede ser reflejada y retransmitida hacia el espacio de nuevo por efecto de la nubosidad ($R_r = 24\%$), por moléculas de aire seco, polvo y vapor de agua ($M_r = 6\%$), o por la superficie de la tierra ($(Q + q)\alpha$), donde Q y q son la radiación solar

directa (31%) y difusa (22%) respectivamente, α es el albedo (capacidad que tienen los cuerpos de reflejar luz en función de su composición y estado de superficie); el cuadro 1.3 muestra valores de albedo para algunas superficies. Este valor es importante pues en el contexto del balance de energía indican que objetos son buenos "absorbedores".

Cuadro 1.3: Valores típicos de albedo para varias superficies (Ahrens, 1988)

OBJETO	ALBEDO (%)
Nieve	75 - 95
Nubes gruesas	60 - 90
Nubes delgadas	30 - 50
Hielo	30 - 40
Arena	15 - 45
Pasto	10 - 30
Agua	10
Bosque	3 - 10

Por otro lado, la radiación solar incidente puede ser absorbida por las nubes ($R_a = 3\%$), por moléculas de aire seco, polvo y vapor de agua ($M_a = 14\%$) o por la superficie de la tierra $(Q + q)(1 - \alpha)$.

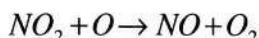
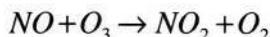
En los principales desiertos del mundo, el 80% de la radiación incidente en el tope de atmósfera alcanza el suelo por su carencia de nubosidad principalmente lo que explica la aridez de esas latitudes. En México, en el norte y noroeste (sur este de los Estados Unidos de Norte América) este valor alcanza los 200 kilolangleys año⁻¹ en los desiertos de Sonora y el Mohave.

En términos del impacto en procesos que se llevan a cabo en la superficie de la tierra y que determinan la disponibilidad de agua, dos gases adquieren relevancia: el Ozono y el Dióxido de carbono.

1.3.1 El Ozono (O_3)

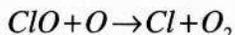
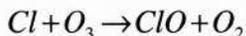
En los orígenes de la vida, el oxígeno empezó a formarse producto de la fotosíntesis de los organismos autótrofos haciendo posible, a través del tiempo, la respiración aeróbica (presencia de oxígeno). La conversión de oxígeno a ozono (O_3), se llevó al cabo al contacto de la atmósfera con energía proveniente de descargas eléctricas. Esta transformación protegió, y protege, a los organismos sobre la faz de la tierra de los dañinos rayos solares ultravioleta promoviendo la evolución de nuevos organismos. De hecho, el ozono es el principal absorbedor de rayos de onda corta (menores de 0.3μ)

La destrucción de moléculas de ozono es producto de una serie de reacciones químicas que involucran gases como el nitrógeno, hidrógeno y el cloro. Por ejemplo, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) son dos gases enemigos naturales del ozono que lo destruyen de la siguiente manera:



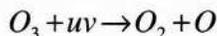
En la primera reacción, el óxido nítrico se combina con el ozono formando dióxido de nitrógeno y oxígeno molecular. Este dióxido de nitrógeno se combina posteriormente con oxígeno atómico para formar óxido nítrico y oxígeno molecular; de esta manera, el ciclo se repite. Ahora bien, el origen de estos gases destructores de ozono son fundamentalmente las bacterias del suelo y los fertilizantes que producen óxido nitroso (NO_2) que en su viaje hacia la estratosfera la energía solar lo convierte en otros óxidos de nitrógeno. Si se considera el incremento dramático en el uso de fertilizantes, el cual es estimado en 170 millones de toneladas para finales del 2001, se podrá tener una percepción de lo que esta sucediendo con la capa protectora de la tierra.

Otro enemigo del ozono son los llamados clorofluocarbonos los cuales son un componente esencial de los productos presurizados en latas y en aparatos de aire acondicionado. Cuando estos compuestos alcanzan una altitud de aproximadamente 30 Km la radiación ultravioleta disgrega las moléculas de flúor carbonos liberando cloro en el proceso dando origen a las siguientes reacciones:

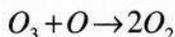


En esta última reacción se libera cloro el cual queda disponible para iniciar de nuevo el proceso. Se ha estimado que un átomo de cloro dura 10 años en la estratosfera por lo que el efecto puede ser a largo plazo.

También, el ozono se destruye de manera natural mediante la absorción de radiación ultravioleta lo cual puede ser ejemplificado como:



La concentración de ozono también varía en función de la colisión con otras moléculas y átomos. Así, el ozono y el oxígeno atómico se pueden combinar dando como resultado:



Si la concertación del ozono decreciera mas allá de lo necesario para protegernos de los rallos ultravioleta, pudiéramos padecer uno o más de los siguientes efectos: incremento en enfermedades de la piel como cáncer (con solo 1% de decremento es la cantidad de ozono), impacto negativo en la agricultura debido a un incremento en la incidencia de rayos ultravioleta y cambios climáticos importantes como calentamiento de la superficie de la tierra y enfriamiento de la estratosfera (Prager y Earle, 2001).

1.3.2 El CO_2

El CO_2 es un componente natural de la atmósfera ocupando el 0.033% (330 partes por millón); sin embargo, esta cantidad *no es constante* (aunque en el cuadro 1.2 aparece como tal), véase Figura 1.2. Su variación es función de algunos factores como la combustión de fósiles que libera grandes cantidades de CO_2 , otras causas son la pérdi-

da de vegetación (por la merma en fotosíntesis que en su proceso toma CO_2 de la atmósfera) y las erupciones volcánicas. Por otro lado, la principal reserva de este gas son los océanos debido a la fijación que de él hace el fitoplancton en la superficie del agua. Sin embargo, estas algas unicelulares se ven seriamente afectadas por la incidencia de rayos ultravioleta ya que no pueden protegerse de esta en virtud que viven gracias a la luz solar. La desaparición de estos seres crearía un efecto en cascada en la cadena alimenticia; así por un lado, la reducción de estos acarrearía un incremento del CO_2 con el consecuente calentamiento global; por otro lado, estos seres son el alimento del zooplancton que a su vez es el alimento de seres mayores (Kandel, 2003). También, las bacterias terrestres que fijan el nitrógeno atmosférico y que se adhieren a las raíces de las plantas leguminosas, son sensibles a la luz ultravioleta de tal manera que un decremento en estas repercutiría invariablemente en una reducción en el rendimiento de algunos cultivos con el consecuente impacto en la población.

Queda claro entonces que la importancia de la concentración del CO_2 en la atmósfera estriba en que este gas, junto con el vapor de agua, atrapa parte de la radiación ultravioleta que refleja la tierra por lo que un incremento de su presencia tendería a calentar el planeta reduciendo severamente la disponibilidad de agua en las zonas áridas y semi áridas. El mecanismo por el cual esto ocurre es que estos gases dejan pasar radiación que proviene del sol (onda corta) y retienen parte de la que refleja la tierra (onda larga) entre la que se encuentra el infrarrojo. Esta absorción de radiación, provoca que los gases ganen energía cinética (energía que produce movimiento) y al colisionar con moléculas vecinas como el oxígeno y el nitrógeno producen calor.

El calentamiento de la atmósfera produciría el deshielo de los polos incrementando el nivel del mar provocando inundaciones en regiones cercanas a las costas. Algunos estudios también muestran que se afectarían también los patrones generales de circulación de aire que mueven los sistemas de tormentas en los continentes.

Conclusión

La teoría Darwiniana, que entró en una profunda crisis debido al descubrimiento de las leyes de la genética en el primer cuarto del siglo XX, asienta que la acción del clima es independiente de la lucha por la existencia de los seres vivos sin embargo, estudios del propio Charles Darwin concluyeron que el clima propiciaba la propagación de individuos en función de las características genéticas de tolerancia o resistencia a eventos extremos (Darwin, 1859). Acorde a Darwin, todo ser vivo tiene sus orígenes en ambien-

tes acuosos y su adaptación a condiciones restrictivas de agua es función de la evolución de su especie; sucintamente esta teoría establece que: «el origen de las modificaciones en la evolución está en las mutaciones azarasas que tienen lugar en la estructura genética de lo viviente. Los rasgos producidos por las mutaciones son escogidos por medio del mecanismo de selección natural y en consecuencia lo viviente evoluciona». La ciencia moderna incluyendo la ingeniería genética y la biotecnología han logrado inducir características deseables en plantas y animales que les permiten incrementar su eficiencia en el uso de los insumos necesarios para su óptimo funcionamiento, mas aún, se ha logrado «manipular» in Vitro los códigos genéticos de seres vivos lo que cuestiona los postulados de Darwin ya que se ha demostrado lo poco probable de la influencia del azar en los procesos evolutivos y se asienta en síntesis que es imposible que los seres vivos hayan evolucionado porque en la naturaleza no existe ningún mecanismo que los lleve a la evolución concordando con las evidencias de los registros fósiles, lo cual demuestra que dicho escenario está muy apartado de la realidad. (Harun, 2004).

También es un hecho que el hombre ha influido considerablemente a modificar patrones climáticos mucho más rápido que el tiempo necesario para que los seres vivos «evolucionen» en consecuencia. Para la agricultura, la alta variabilidad en precipitación pluvial es sinónimo de riesgo. Este hecho dio origen a la agricultura de riego en donde las cantidades necesarias de agua son suministradas a los cultivos en el tiempo y cantidades adecuadas para potenciar su rendimiento.

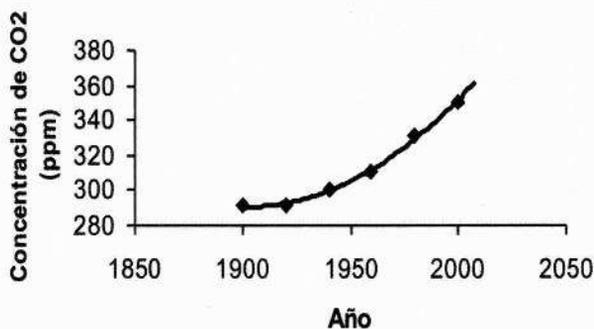


Figura 1.2: Variación de la concentración de CO₂ en el tiempo (Sagan, 1998)

Capítulo II

Disponibilidad del recurso

El agua en el contexto global

La disponibilidad de agua en los continentes es fuertemente dependiente de la circulación general del aire en la tierra. Las variaciones en velocidad y dirección de estas corrientes obedecen a su vez a las diferentes cantidades de calor disponible en la superficie de la tierra. La ciencia ha demostrado que el balance de energía no es igual en las diferentes latitudes existiendo mayor energía en los trópicos que en los polos creando así un gradiente de mayor a menor disponibilidad. Así, para balancear estas diferencias la atmósfera transporta aire caliente hacia los polos y aire frío hacia el ecuador. Para el entendimiento del mecanismo de este movimiento de masas de aire, se han propuesto diversas teorías (Eduards, 2000.) siendo la mas aceptada la de las “tres celdas” en virtud de que, aunque existen discrepancias con las observaciones atmosféricas, asemeja con cierta precisión la realidad (Sellers, 1975); la Figura 2.1 esquematiza el modelo de las tres celdas.

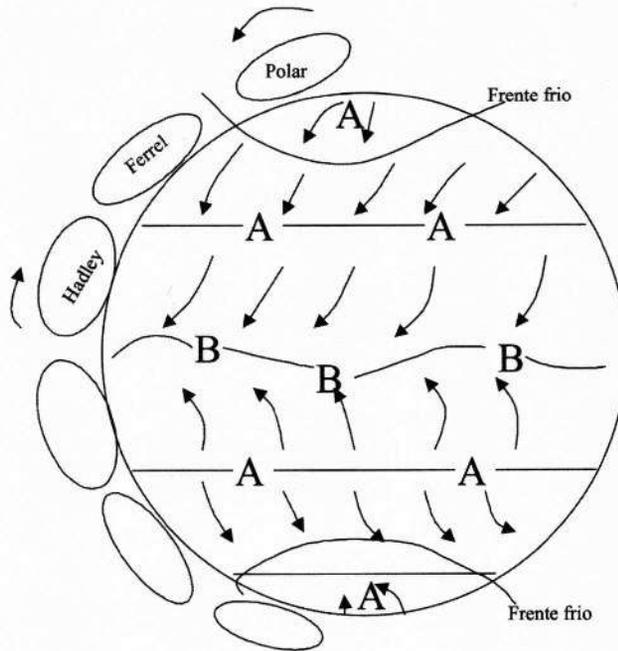


Figura 2.1: Circulación de los aires acorde al modelo de las tres celdas.

2.1 La causa de la aridez

Los océanos cubren el 81% del hemisferio sur y 61% del hemisferio norte. Los continentes del hemisferio norte se encuentran ubicados principalmente entre los 40° y 70° y las máximas elevaciones se encuentran entre los 20° y 50° de latitud. En el hemisferio sur los continentes se localizan entre los 40° y 60° de latitud (Antón, 1996, 1999)

Acorde a la teoría de las tres celdas (se fundamenta en el transporte de aire caliente del ecuador a los polos), éstas son las encargadas de distribuir la energía en la tierra. Sobre las aguas en el ecuador el aire es caliente, los gradientes de presión horizontal son débiles y los vientos son ligeros. El aire caliente se eleva condensándose en nubes tipo Cumulus y provocan tormentas eléctricas que liberan calor latente. Este calor provee energía que activa la celda Hadley; así, el aire que se eleva llega a la tropopausa la cual actúa como una barrera lo que provoca que el aire se mueva lateralmente hacia los polos. La fuerza de Coriolis (debido a la rotación de la tierra) hace que

este flujo se desvía hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur.

El aire que se mueve hacia los polos desde los trópicos se hace más denso en virtud de que se enfría por radiación y empieza a converger en latitudes hacia los 30° produciendo zonas de alta presión (A), ó anticiclones. A medida que este aire convergente desciende se torna mas caliente y seco lo que produce cielos claros y temperaturas superficiales calientes. Es precisamente en estas latitudes donde se encuentran los principales desiertos del mundo. De aquí, parte de las corrientes de aire en la superficie regresa al ecuador (afectado por la fuerza de Coriolis). Cerca del ecuador, los vientos del noreste convergen con los del sur este en una franja llamada Zona Intertropical de Convergencia (ITCZ, por sus siglas en inglés); en esta región, el aire se vuelve a elevar y continua el proceso. En esta zona, la intensidad de los rayos solares y el consecuente clima caliente eleva la temperatura del aire transportando su humedad hacia latitudes superiores. A cierta latitud, el aire se enfría liberando la humedad acumulada en series de tormentas de forma casi permanente. La Figura 2.2 es una imagen de satélite de la Agencia de Administración del Espacio de los Estados Unidos de Norte América (NASA, 2004).

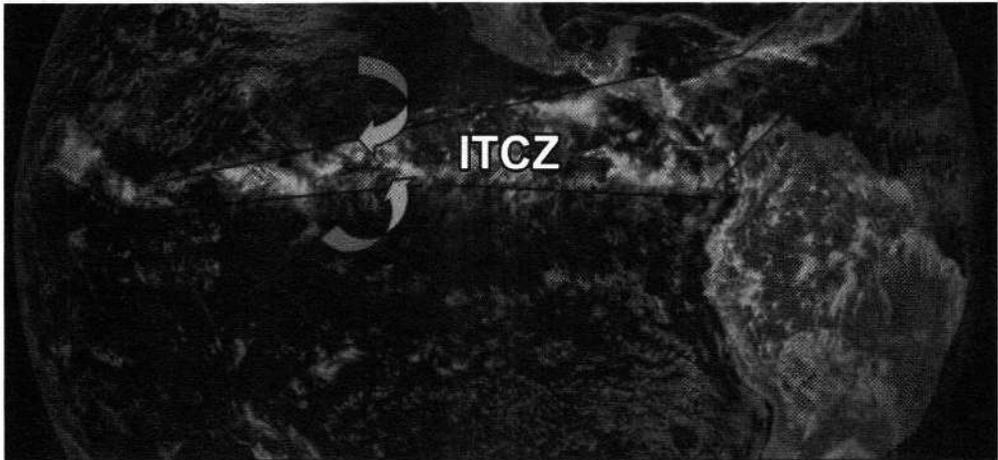


Figura 2.2: La zona Intertropical de Convergencia (GOES – 11 Nasa, 2004).

La variación de la ubicación de la ITCZ afecta de manera drástica la ocurrencia de precipitación en los países cercanos al ecuador resultando en las estaciones húmedas y secas en los trópicos en vez de estaciones calientes y frías a mayores latitudes. Los cambios a más largo plazo en la ITCZ resultan en severas sequías o inundaciones en

esa latitud.

En la latitud de 30°, no todo el aire se mueve hacia el ecuador, una porción se mueve hacia los polos inclinándose hacia el este en ambos hemisferios. A medida que este flujo de aire se aproxima a los polos, se encuentra con aire frío; sin embargo, estas dos corrientes no se mezclan porque lo impide el frente polar que es una zona de baja presión (B) donde el aire superficial converge, se eleva y se desarrollan tormentas. Parte del aire que se eleva, regresa a latitudes elevadas donde baja hacia la superficie. La celda causante de este movimiento se le conoce como Ferrel.

Detrás del frente polar el aire frío de los polos es distorsionado por el efecto de Coriolis por lo que el patrón general de circulación en esa zona es hacia el noreste. En invierno el frente polar puede moverse a latitudes sub tropicales produciendo frentes fríos.

En el frente, una porción del aire que se eleva se mueve hacia los polos y la fuerza de Coriolis distorsiona el aire hacia el oeste a altos niveles. El aire llega a los polos y lentamente desciende hacia la superficie y fluye de regreso hacia el frente polar completando la Celda Polar.

2.2 ¿Cuanta agua tenemos?

La disponibilidad del recurso agua es sobreestimada por los gobiernos quizá por la aparente abundancia en los océanos (dos terceras partes cubren a la tierra). Esta ilusión de abundancia ha ensombrecido la realidad de que el agua renovable¹ es un recurso cuya escasez se incrementa en forma alarmante. Esta escasez se fundamenta en el desbalance del ciclo hidrológico² que propicia el hombre al extraer o usar el agua más rápido de lo que se repone por el ciclo hidrológico (ver Figura 2.3).

¹ Es el volumen de agua con el cual la humanidad puede contar para sus diferentes usos en una escala anual

² El ciclo hidrológico de manera sucinta se refiere al camino que sigue el agua desde que es evaporada de los océanos por el sol. Este proceso genera nubosidad que cuando se convierte en lluvia sobre los continentes, una parte se infiltra en el suelo, otra escurre hacia los embalses, ríos y lagos y otra parte regresa al mar.

El ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua en los océanos (Ev); de aquí es transportada tierra adentro por masas de aire que a su vez obedecen a patrones de circulación global dictados en gran medida por la posición geográfica de los continentes. Esta agua cae a tierra por el fenómeno de precipitación iniciando los procesos hidrológicos de escurrimiento superficial y subterráneo (Q y Q_s respectivamente), infiltración (Z) y evapotranspiración (Et). Los valores que toman algunas variables que impactan al ciclo hidrológico son producto de correlaciones algunas veces difíciles de cuantificar. Por ejemplo el gradiente de altitud explica de manera satisfactoria las precipitaciones anuales en una cuenca hidrológica; también, la temperatura disminuye con la altitud con la consecuente condensación y ocurrencia de lluvias. En el cuadro 2.1, Descroix *et al* (1997) presentan una matriz de correlación de variables para una región hidrológica del norte árido de México; algunas correlaciones están también influenciados por las acciones del hombre en los ecosistemas.



Figura 2.3: El ciclo hidrológico (Adaptado de Guerrero, 1991).

Cuadro 2.1: Correlación entre variables explicativas de la precipitación (Cuenca Nazas - Aguanaval, Descroix *et al* 1997)

	PP	ALT	DIST OCE	LAT	LONG	VG1	VG2	VG3
PP	1	0.85	-0.85	0.32	0.70	0.58	0.65	0.63
ALT		1	-0.75	-0.55	0.49	0.57	0.57	0.51
DIST OCE			1	0.38	-0.84	-0.48	-0.54	-0.57
LAT				1	0.12	-0.11	-0.22	-0.11
LONG					1	0.42	0.45	0.54
VG1						1	0.77	0.73
VG2							1	0.93
VG3								1

VG1 = Densidad e la vegetación en un área de 30 hectáreas alrededor de la estación pluviométrica.

VG2 = Densidad e la vegetación en un área de 1600 hectáreas alrededor de la estación pluviométrica.

VG3 = Densidad e la vegetación en un área de 9400 hectáreas alrededor de la estación pluviométrica.

DIST OCE = Distancia al océano

Del anterior cuadro se observa que la precipitación y la distancia al océano están inversamente relacionadas (- 85%) ya que la precipitación decrece a medida que el punto de observación se aleja del océano (signo negativo en el valor); también se observa que, para este lugar, la precipitación se correlaciona más con la longitud del lugar que con la latitud.

Acorde a diversos estudios (Antón, 1996, Bramer, 2004, Postel, 1997) el 97.5% del agua total del planeta es agua salina, y el restante 2.5% es agua dulce. De éste último porcentaje, el 69% (124, 060,000 km³) se encuentra en los glaciares y cubiertas de nieve, 30% es agua dulce de los acuíferos (10,530,000 km³), 0.3% es agua dulce en lagos y ríos (93,000 km³) y 0.9% en otros entre los que se incluye al agua del suelo, pantanos, etc. (342,000 km³); véase Figura 2.4

A nivel global, México se encuentra entre los países con mayor disponibilidad de agua per cápita a escala mundial con 4226 m³ por año. Este dato no considera la

variabilidad espacial de la disponibilidad del recurso en las diferentes regiones hidrológicas el país (discutido líneas adelante). También, en nuestro país, anualmente se utilizan 72 mil millones de metros cúbicos en usos consuntivos. De éstos, el 61% corresponde a aguas superficiales y 39% a aguas subterráneas. De ésta última fuente, se sirve el 67% del agua usada en agricultura, el 20% en uso público urbano y el 13% de la industria; (véase Figura 2.5)

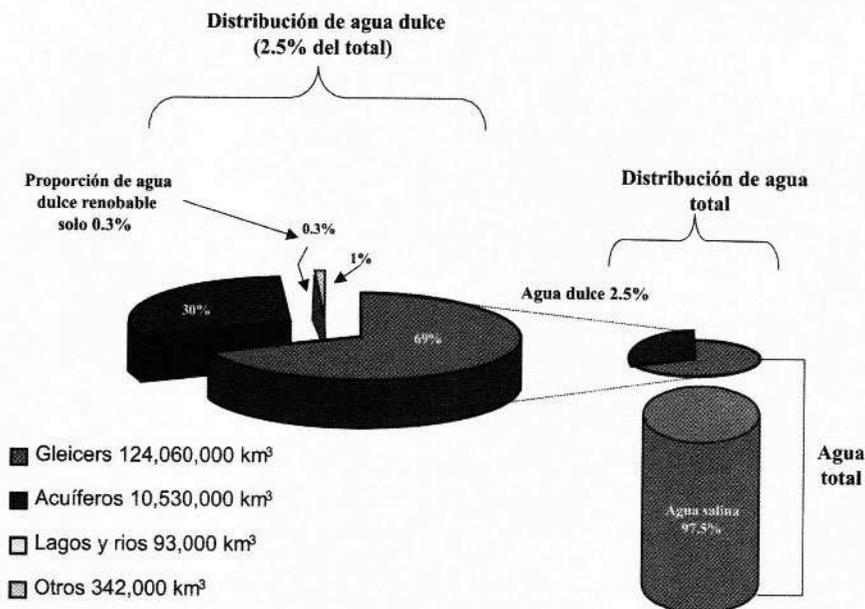


Figura 2.4: Disponibilidad de agua en el planeta. (Adaptado de Marin, 2003)

2.3 Balance Regional

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece como límite para el desarrollo armónico de la sociedad, una disponibilidad de 2,500 metros cúbicos de agua por persona por año, para satisfacer todas sus necesidades primarias, la producción agropecuaria y de bienes y servicios. La capacidad hidrológica de algunas de las cuencas hidrológicas que abastecen de este recurso a la población que en ellas viven, es inferior a la cifra que recomienda la OMS, por lo que el agua se tiene que importar de otras partes del país, como productos manufacturados o materias primas para la industria y la agricultura.

Sin pérdida de generalidad, la zona de captación de este recurso es la parte alta de las cuencas que en algunas regiones ha venido a menos por el enorme deterioro ecológico a la que se han sometido.

Con el objetivo de ofrecer un panorama del estado de la disponibilidad de agua en el país, se presenta un balance por región hidrológica³ el cual pone de manifiesto la vulnerabilidad de las regiones en cuanto a la disponibilidad del recurso.

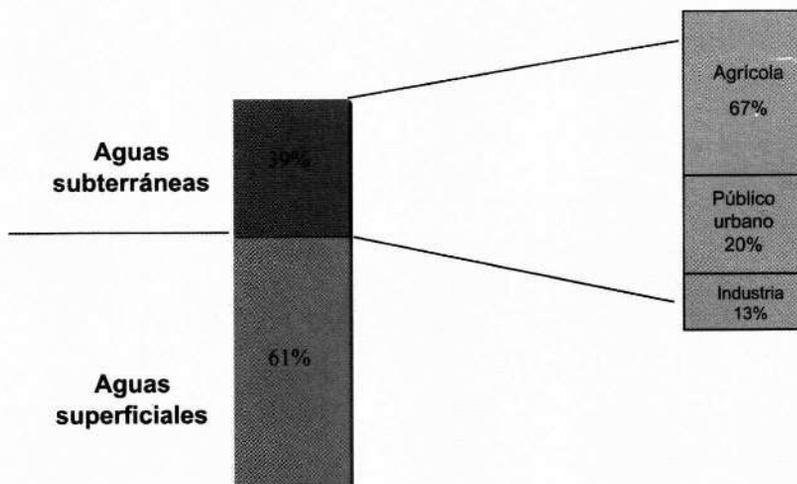


Figura 2.5: Disponibilidad de agua en México (Adaptado de CNA 2004)

I Región Península de Baja California: Comprende los estados de Baja California Norte y Sur con una extensión territorial de 148.9 (miles de km²) teniendo una densidad de población de 19 habitantes por km² y una disponibilidad de agua por habitante por año de 1434 m³. Abarca dos consejos de cuenca, una por estado. En la vertiente del Pacífico cuenta con una porción del Río Colorado con gasto promedio de 7.2 m³.seg⁻¹ teniendo una cuenca vertiente de 5180 km². El clima es desértico, los deshielos originan grandes avenidas y las inundaciones afectan las partes bajas de las cuencas. Existe sobre explotación de acuíferos. El excesivo bombeo en algunas regiones ha causado intrusión salina mermando la productividad de la agricultura teniendo necesidad de cancelación y reubicación de pozos. La industria ha entrado en estrecha competencia con el sector agropecuario por el agua con consecuencias en la calidad de esta.

³ Para la adecuada administración del recurso hidráulico, la Comisión Nacional del Agua (CNA) ha dividido al país en 13 regiones administrativas con criterio que enmarca la capacidad de producir el recurso considerando variables hidrológicas y físicas.

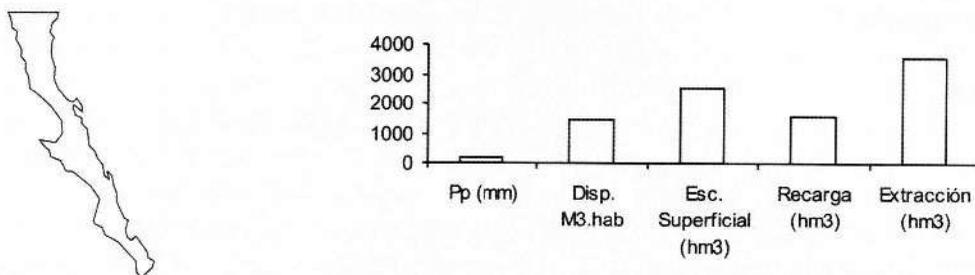


Figura 2.6: Balance Región I Península de Baja California

II Región Noroeste: Comprende principalmente el estado de Sonora y la porción oeste del estado de Chihuahua, contando con una extensión territorial de 216.1 (miles de km², sin considerar al Distrito de riego N0. 014 Río Colorado). Tiene una densidad de población de 11 habitantes por km² con una disponibilidad de agua de 3415 m³ por habitante. Abarca tres consejos de cuenca: Alto noroeste, Ríos Yaqui y Matapé y Río mayo. En la vertiente del Pacífico cuenta con el Río Yaqui con un gasto promedio anual de 89 m³.seg⁻¹ cuya área de la cuenca es de 72540 km². La precipitación promedio anual es de 476 mm la extracción sobrepasa en el doble a la recarga. Cuenta además con cuatro presas en el estado de Sonora de las cuales tres son para generación de energía eléctrica e irrigación (Alvaro Obregón, Plutarco Elías Calles y Adolfo Ruiz Cortínez) y una exclusivamente para irrigación (Lázaro Cárdenas). Los principales problemas en los distritos de riego de esta región son por salinidad, drenaje, abatimiento de mantos acuíferos y desecho de aguas industriales.

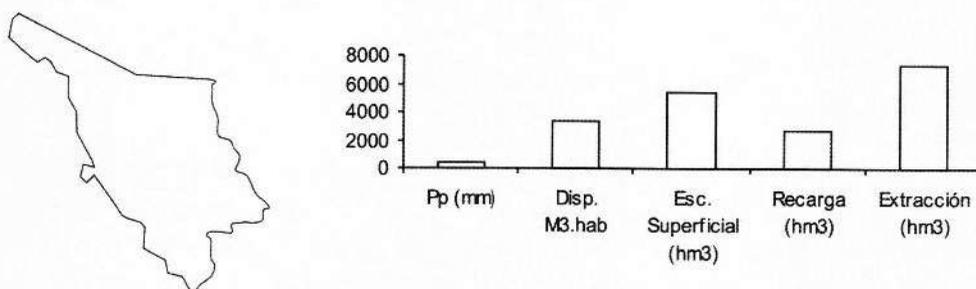


Figura 2.7: Balance Región II Noroeste

III Región Pacífico Norte: Comprende el estado de Sinaloa, el sur oeste del estado de Chihuahua . la porción sur del estado de Durango, el noroeste de Nayarit y

una pequeña porción del oeste de Zacatecas. Su extensión territorial es de 150.1 (miles de km^2) con una densidad de población de 26 habitantes por km^2 y una disponibilidad de agua de 6570 m^3 . habitante por año. Abarca tres consejos de cuenca : Ríos Fuerte y Sinaloa, Ríos Mocerito al Quelite y Ríos Presido al San Pedro. Es una de las regiones con más ríos, así, en la vertiente del pacífico cuenta con los ríos: San Pedro, Culiacán, San Lorenzo, Piaxtla, Acajoneta, El Fuerte, y el Río Sinaloa. La precipitación promedio anual es de 869 mm . aunque el escurrimiento superficial virgen medio es alto (23950 hm^3), presenta una de las recargas mas pequeñas del orden de 1475 hm^3 . Cuenta con las siguientes presas: Luis Donald Colosio, Miguel Hidalgo, Adolfo López Mateos, José López Portillo y Gustavo Díaz Ordáz; todas son para generación de energía eléctrica e irrigación.

Cuenta con seis distritos de riego que cubren 484000 has en total y en donde los principales problemas relativos al recurso agua son: Manto fríasico elevado, salinidad, contaminación de acuíferos, e inocuidad. En la sierra de Durango existe un deterioro del bosque causando alteraciones en el balance hidrológico.

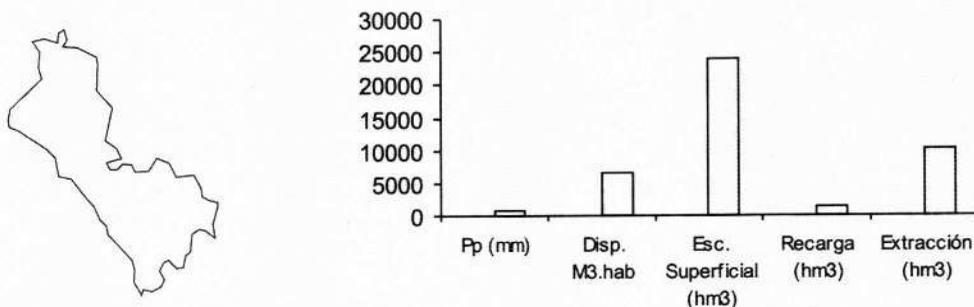


Figura 2.8: Balance Región III Pacifico Norte

IV Región Balsas: Comprende una pequeña porción al sur este del estado de Jalisco, Gran parte de los estados de Michoacán y Guerrero, la porción oeste de Oaxaca, el estado de Morelos y parte del estado de Puebla y la porción sur del estado de México y Tlaxcala. Tiene una densidad de población de 84 habitantes por km^2 con una disponibilidad de agua por habitante por año de 2835 m^3 . Comprende el consejo de cuenca del Balsas y un solo río, el Balsas con un gasto promedio de $496 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ con área de cuenca de $117\,406 \text{ km}^2$. La precipitación promedio es de 1099 mm por año y en virtud de el gran escurrimiento anual, la extracción no rebasa esta cantidad. Cuenta con dos presas una en los estados de Michoacán y guerrero para generación de energía (Adolfo López Mateos) y otra en el estado de guerrero para el mismo propósito.. Cuenta con 6

distritos de riego que comprenden 105 200 hectáreas en donde los principales problemas se circunscriben a una excesiva erosión hídrica por el deterioro de la cuenca, y una creciente competencia y contaminación por la industria.

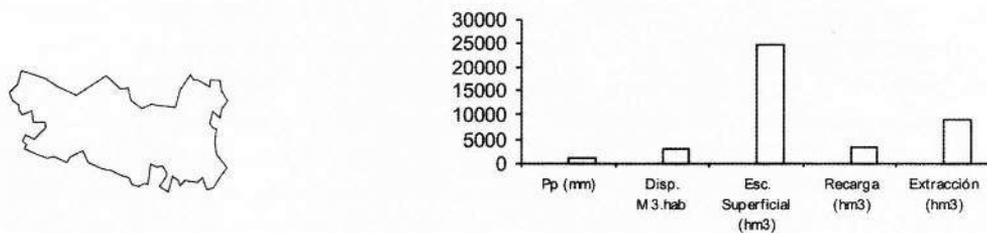


Figura 2.9: Balance Región IV Balsas

V Región Pacífico Sur: Comprende las porciones sur, sur este y sur oeste de los estados de Oaxaca y Guerrero con una extensión territorial de 79.6 (miles de km²). Su densidad de población es de 49 habitantes por km² teniendo una disponibilidad media de agua de 9294 m³ por habitante por año. Abarca dos consejos de cuenca y 4 distritos de riego que cubren una superficie de 6269 has. En la vertiente del pacífico cuenta con tres ríos (Ometepec, Verde y Papagayo) que arrojan gastos de 185.3, 154.3 y 104.1 m³.seg⁻¹ y teniendo como área de cuenca 6 922, 18 812 y 7410 km² respectivamente. Su precipitación media anual es de 1 446 mm no existiendo diferencia sustancial entre la recarga y la extracción. En esta región se ubican cuatro distritos de riego que abarcan 31 200 has. El balance hidrológico muestra un periodo de seca que abarca desde diciembre hasta mayo en donde la evapotranspiración es mayor a la precipitación y durante el periodo húmedo, la precipitación sobrepasa por mucho a las necesidades de los cultivos.

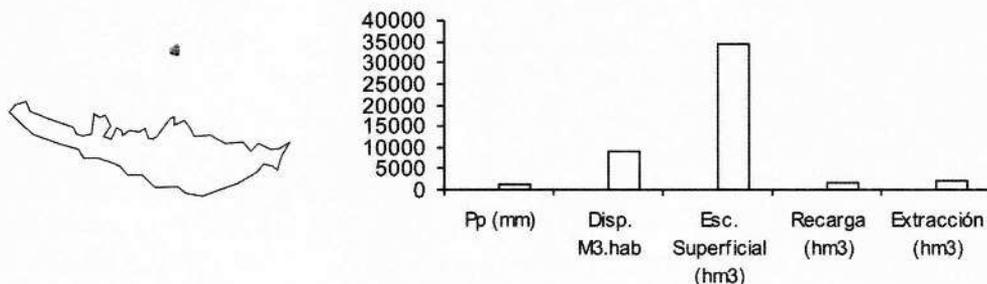


Figura 2.10: Balance Región V Pacífico Sur

VI Región Río Bravo: Comprende gran parte del estado de Chihuahua , Coahuila y Nuevo León así como la porción norte de Tamaulipas y una pequeña porción al sur este de Chihuahua y noroeste de Durango. La densidad de población es de 25 habitantes por km² contando con una disponibilidad de agua de 1316 m³ por habitante por año. Comprende el consejo de cuenca de Río bravo contando con el río del mismo nombre en la vertiente del Golfo de México con un gasto a la descarga de 46.4 m³.seg⁻¹ y un área de cuenca de 247 163 km² (únicamente la porción que se encuentra en México). La precipitación promedio anual es de 430 mm guardando desproporción negativa entre la extracción y la recarga. Destacan por su importancia las presas de la Amistad, La boquilla, Marte R. Gómez , el Cuchillo y la Venustiano Carranza; todas utilizan agua para riego y algunas para generación de energía. En esta región se ubican cinco distritos de riego que cubren 54 700 has mostrando todos un balance negativo entre la evapotranspiración y la precipitación lo que implica la necesidad del riego.

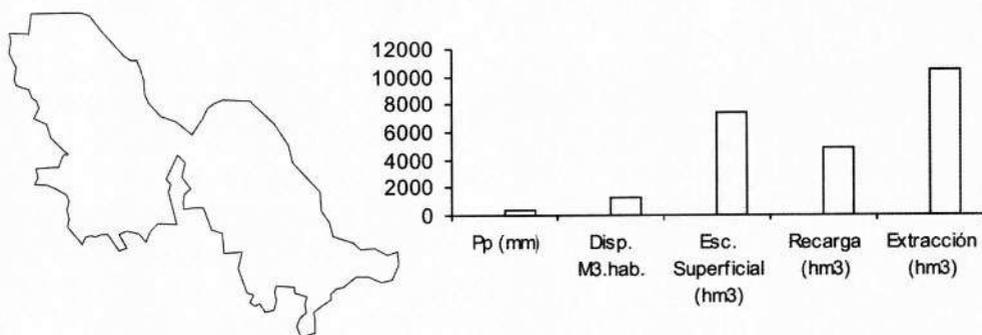


Figura 2.11: Balance Región VI Río Bravo

VII Región Cuencas Centrales del Norte: Comprende la porción este y sur este del estado de Coahuila, la porción media norte del estado de Durango (mitad del estado, a excepción de la porción noroeste de este estado que ocupa la región VI), la porción noroeste del estado de Nuevo León y una pequeña porción al suroeste de Tamaulipas, la porción norte de Zacatecas, el cuadrante noreste de San Luis Potosí. Su densidad de población es de 18 habitantes por km² con una disponibilidad per capita anual de 1470 m³ . Comprende el consejo de cuenca Nazas Aguanaval y el del altiplano. Aunque cuenta con ríos importantes, sus cuencas son endorreicas por lo que las presas de almacenamiento adquieren relevancia. En este sentido, la principal obra de almacenamiento es la presa Lázaro Cárdenas en el estado de Durango que contiene las aguas del Nazas.

El principal distrito de riego es el 017 de la Comarca Lagunera el cual presenta déficit evapotranspirativo⁴ durante todo el año.

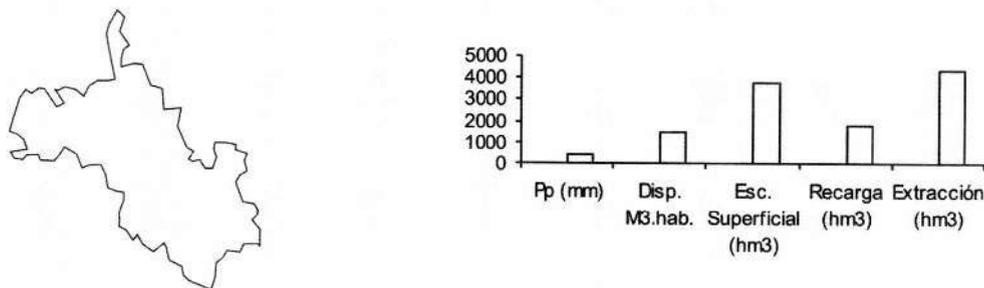


Figura 2.12: Balance Región VII Cuencas Centrales del Norte

VIII Región Lerma Santiago – Pacífico: Comprende el estado de Jalisco, casi la totalidad de Nayarit a excepción de la porción noroeste, el estado de Colima, parte suroeste y Norte de Michoacán, Aguascalientes, Guanajuato, el sur de Zacatecas, el suroeste de Querétaro y el este del Estado de México. La densidad de población es de 98 habitantes por km² con una disponibilidad media anual de agua per cápita de 1879 m³. Ocupa el segundo lugar en densidad de población y junto con las regiones VI y VII son las que menos disponibilidad de agua por habitante tienen. Cuenta con dos consejos de cuenca: Lerma Chapala y Río Santiago. Resaltan por su importancia dos presas, Puncitlán y Aguamilpa y ocho distritos de riego que en su conjunto suman 223 300 has.

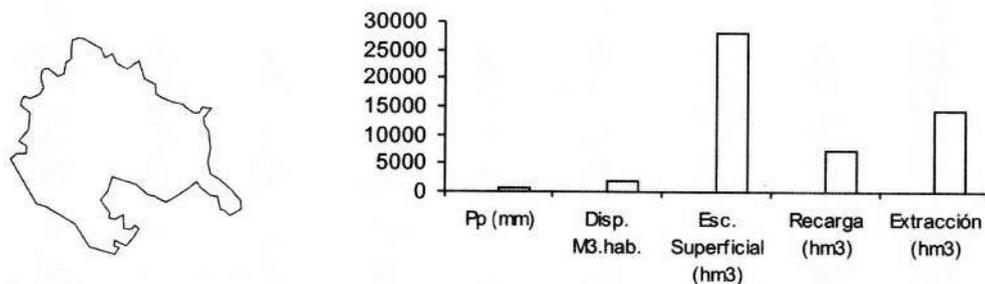


Figura 2.13: Balance Región VIII Lerma Santiago - Pacífico

⁴ El déficit evapotranspirativo se refiere a la discrepancia entre la demanda de agua de los cultivos y la precipitación del lugar. Cuando la precipitación excede o iguala a la demanda, se dice que no existe déficit.

IX Región Golfo Norte: Comprende gran parte del estado de Tamaulipas y la porción norte de Veracruz, Querétaro, la porción sur este de San Luis Potosí, una pequeña porción del noreste de Guanajuato, la porción norte de Hidalgo y de el estado de México. Su densidad de población es de 38 habitantes por km² con una disponibilidad de agua de 4866 m³ por habitante por año. Comprende los consejos de cuenca de Río Pánuco y San Fernando Soto la Marina. Destacan además las presas Vicente Guerrero (Las Adjuntas) y Zimapan. En esta región se ubican cinco distritos de riego que en su conjunto acumulan 200 000 has. En la vertiente del Golfo cuenta con el Río Pánuco el cual en su descarga lleva un gasto medio anual de 527 m³.seg⁻¹ teniendo un área de cuenca de 84956 km².

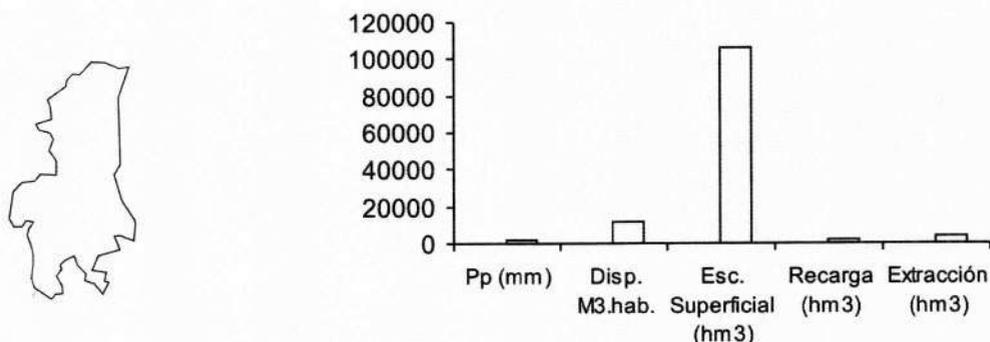


Figura 2.14: Balance Región IX Golfo Norte

X Región Golfo Centro: Abarca la mayor parte del estado de Veracruz a excepción de la porción norte que es ocupada por la Región IX. Cubre también el cuadrante noreste de Oaxaca y una pequeña porción del este de Morelos. Cuenta con una densidad de población de 87 habitantes por km² con una disponibilidad de agua per cápita anual de 11834 m³ ocupando el tercer lugar en este valor. En su territorio se destacan las presas Miguel Alemán y Miguel de la Madrid ambas localizadas en Oaxaca contando además con siete ríos :Coatzacoalcos, Papaloapan, Tecolutla, Nautla, Antigua, Cazones y Tuxpan. Ahí se ubica el distrito de riego Río Blanco en el estado de Veracruz el cual presenta un déficit evapotranspirativo en los meses de Octubre a Mayo.

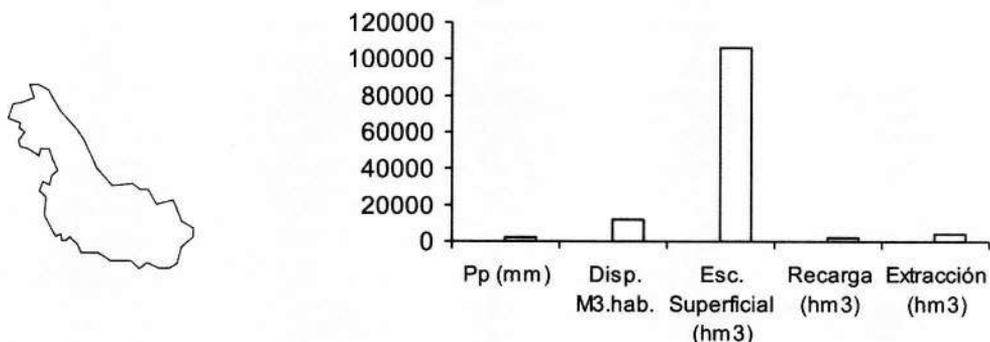


Figura 2.15: Balance Región X Golfo Centro

XI Región Frontera Sur: Abarca los estados de Chiapas, Tabasco, una pequeña porción al suroeste de Campeche y otra al sureste de Oaxaca. Es la región con mas disponibilidad de agua por habitante de 27 152 m³ por año. Sin embargo, este recurso es usado principalmente en la generación de energía a través de las presas: Belisario Domínguez (La Angostura), Nezahualcóyotl (Malplaso), Manuel Moreno Tórres (Chicoasén) y Ángel albino Corzo (Peñitas). Se ubican cuatro distritos de riego que suman 36 400 has. Estos distritos de riego presentan un periodo de secas de noviembre a abril no existiendo infraestructura hidráulica para almacenar los excesos para uso agropecuario. De aquí que existan problemas de erosión y el riego sea indispensable fuera de la época de lluvias.

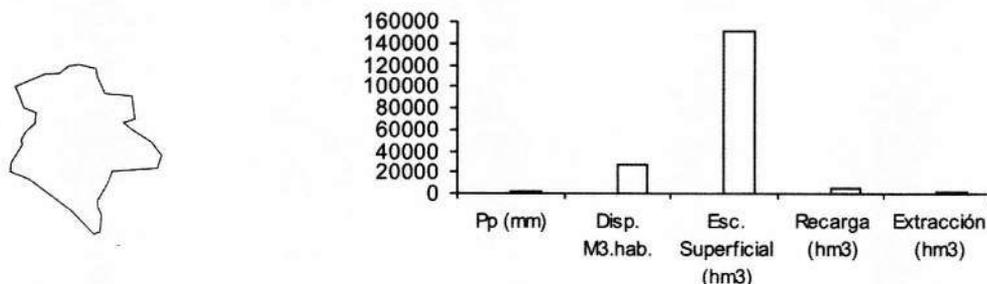


Figura 2.16: Balance Región XI Frontera Sur

XII Región Península de Yucatán: Comprende los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo . Su densidad de población es de 23 habitantes por km² con una disponibilidad media de agua por persona por año de 10 912 m³ ocupando el segundo lugar en este renglón. No cuenta con presas importantes pero si con almacenamientos antiguos que son usados en diferentes actividades. Cuenta con el Río Candelaria con un gasto medio anual en la desembocadura de 50.6 m³.seg⁻¹ teniendo una cuenca de 9628 km². En algunas partes los suelos son someros mostrando material madre lo que impulsa una agricultura sui generis. Cuenta con tres distritos de riego, uno por estado que comprenden 46 400 has. El distrito de riego 048 (Ticul) en Yucatán, es el que presenta el mayor déficit evapotranspirativo.

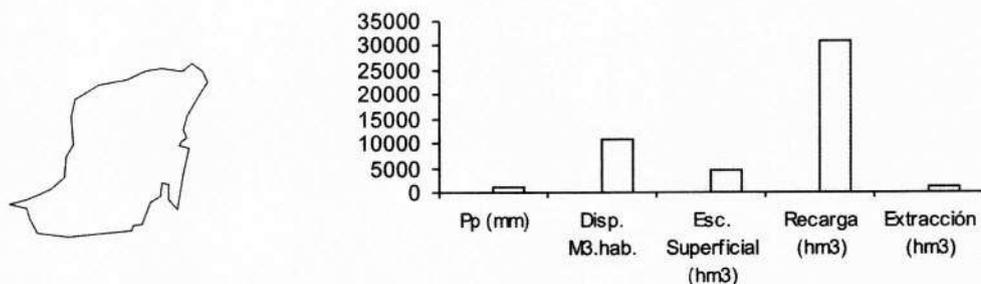


Figura 2.17: Balance Región XII Península de Yucatán

XIII Región Valle de México: Comprende los estados de México, Hidalgo y el Distrito Federal. La contaminación en casi todas las corrientes y cuerpos receptores por falta de infraestructura de saneamiento de las aguas residuales, impide su adecuada reutilización; existe una sobreexplotación acentuada de los acuíferos. Presenta la disponibilidad mas baja per cápita del orden de 171 m³ por habitante por año, debido a la enorme población urbana. No cuenta con vasos de almacenamiento importantes y con 4 distritos de riego que suman 41 700 has.

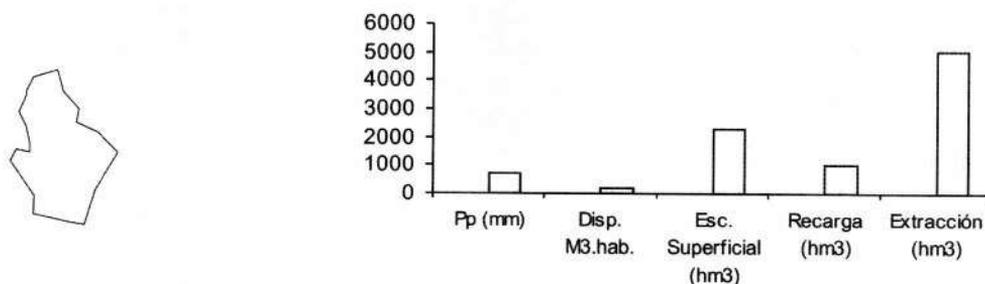


Figura 2.18: Balance Región XIII Valle de México

Actualmente no existe tecnología que pueda garantizar la expansión de la disponibilidad de agua dulce. El proceso de desalinización del agua de mar es costoso e implica contaminación y uso de combustibles fósiles. La realidad es que el agua dulce disponible es esencialmente la misma que hace 2000 años; la diferencia es que en esa época había solo el 3% de la cantidad de habitantes de hoy en día.

Como se anotó anteriormente, la disponibilidad de agua para los diferentes usos depende principalmente del clima y específicamente de la cantidad y oportunidad de la precipitación y de la demanda evaporativa que es una medida de la cantidad de humedad que la atmósfera puede retener la cual a su vez es fuertemente dependiente de la temperatura. En zonas áridas la relación precipitación – evaporación es tan baja que no existe posibilidad de capturar agua para consumo humano. La Figura 2.19 muestra el índice de disponibilidad de humedad (IDH) para el continente americano en dos épocas del año, enero (A) y agosto (B). Este IDH resulta del cociente entre la precipitación posible de ocurrir al 75% de probabilidad y la evapotranspiración potencial⁵. De la Figura resulta obvio la disponibilidad de humedad en el mes de agosto mes en que se encuentran en desarrollo los principales cultivos del continente. La Figura 2.20 muestra la variación del IDH en diversas latitudes de México; mientras mayor sea el índice menor el déficit de agua; así, de esta Figura se observa que hacia el norte crece esta deficiencia. Sin embargo, como lo indica la variación estacional, aún en latitudes lluviosas existe déficit en determinadas épocas del año por lo que las obras de almacenamiento adquieren relevancia.

⁵ Este término es comúnmente usado en agricultura y se refiere a la cantidad de agua que usaría un cultivo en su proceso de desarrollo asumiendo que no le faltaría este insumo en ninguna etapa del crecimiento.

Es claro entonces que la disponibilidad de precipitación varía grandemente en espacio y tiempo. Así, existen zonas en las que pueden precipitar más de 1000 mm en unos cuantos días y padecer de sequía el resto del año. Por otro lado, en zonas áridas, normalmente el patrón de la escasa precipitación se ubica en un periodo muy corto de tiempo con lluvias de alta intensidad y corta duración. En México por ejemplo, tres cuartas partes de la población vive en zonas áridas y semiáridas mientras que cuatro quintos del agua superficial disponible se encuentra en zonas de alta precipitación donde vive solo una cuarta parte de la población (CNA, 2004).

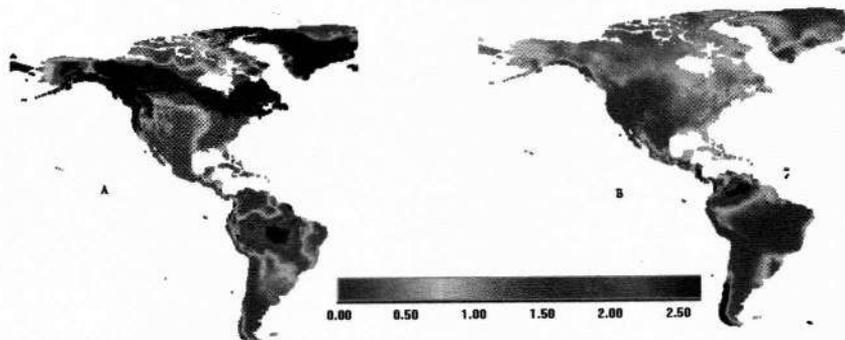


Figura 2.19: Índice de disponibilidad de humedad en el continente americano para el mes de enero (A) y el mes de agosto (B); a mayor valor menor déficit.

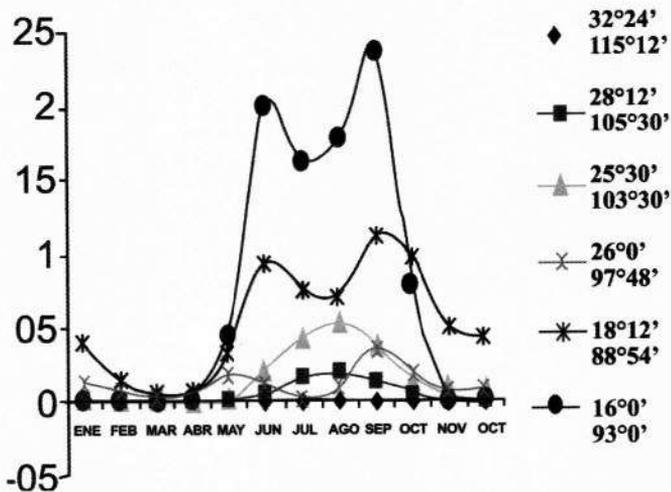


Figura 2.20: Variación del Índice de disponibilidad de humedad para diversas latitudes en México. Nótese que a mayor latitud mayor déficit.

Capítulo III

Acciones e Impacto

Se han ya asentado algunas de las amenazas naturales o inducidas que ponen en riesgo la vida en la superficie de la tierra; así, se comentó el efecto de la composición de la atmósfera en la cantidad de energía radiante que llega al suelo. Ha quedado claro que la influencia del hombre acentúa el problema del deterioro ambiental con graves consecuencias para la continuidad de la vida. Sin embargo, existen interacciones complejas entre esas amenazas que no son consideradas normalmente cuando se trata de explicar la variación en la disponibilidad del agua para sus diferentes usos.

Acorde a Galarza, (2000), entre 1990 y 1995, la demanda mundial de agua se ha incrementado en seis veces debido a la tasa de crecimiento poblacional. También, las reservas de agua se ven amenazadas por el calentamiento global climático registrado desde hace tiempo (Molden, *et al*/2001).

Falkenmark y Widstrand (1992) han establecido un índice de estrés en la disponibilidad de agua fundamentado en un nivel mínimo de agua requerido per capita por año para mantener una adecuada calidad de vida en un país “moderadamente desarrollado” en zonas áridas. Después de algunas adecuaciones se llegó a las siguientes conclusiones:

- Un país cuya disponibilidad de agua dulce renovable en base anual excede los 1700 m³ por persona, sufrirá solo problemas de déficit ocasional y localizado;

por debajo de esta cantidad, se empieza a sufrir estrés de manera periódica o regular.

- Cuando la disponibilidad es menor a 1000 m³ por persona por año, los países se catalogan como escasez de agua crónica en donde la falta de agua empieza a impactar el desarrollo económico, la salud humana y el bienestar en general.
- Si la disponibilidad de agua fresca es menor a 500 m³ por persona por año, se dice entonces que el país sufre de escasez absoluta con los problemas que esta situación implica.

Estos niveles no deberán ser considerados como precisos. Así, el nivel que corresponde a una determinada región o país, dependerá de algunos factores como clima, y el nivel de desarrollo económico. Por otro lado, el Banco Mundial y algunos analistas han considerado que el índice de estrés de agua se ubica en los 1000 m³ por habitante por año; por debajo de este índice se presentan los problemas ya comentados. Incomprendiblemente, el PAI (2004), ubica a México como un país en donde no existe estrés de agua en virtud de que, acorde a sus cálculos, existen 4700 m³ por habitante por año. Sin embargo, esto dista mucho de la realidad como se verá a continuación. En México, se espera que al 2010 la población sea de 112 millones. Véase Cuadro 3.1.

En la Figura 3.1 se aprecia la propagación del efecto de un evento climático extremo sobre diferentes escalas (local, regional, nacional y global) y en diferentes sectores (agrícola, económico y social). En esta figura se puede observar el impacto de una sequía prolongada; a escala local en el sistema agrícola impacta directamente al rendimiento de los cultivos, en el sistema económico y a la misma escala, impacta el ingreso creando vulnerabilidad. El impacto en la sociedad es el estrés con repercusiones en la salud, bancarrota, crecimiento de deudas, etc. Esta figura puede ser usada para vislumbrar las acciones pertinentes para sobrellevar el riesgo implícito a un evento extremo.

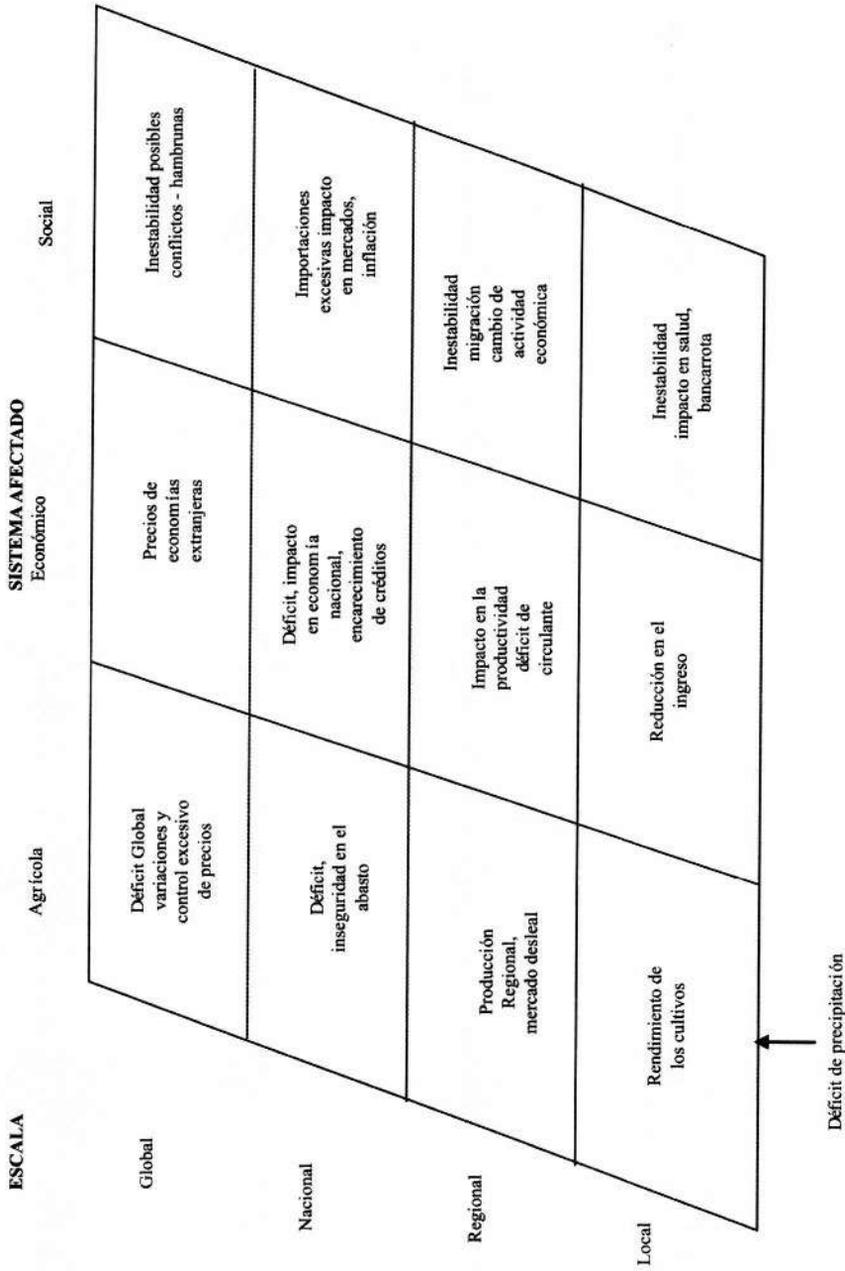


Figura 3.1: Impacto en cascada de déficit de precipitación en diferentes escalas y sistemas.

Cuadro 3.1: Proyección de la población al 2010. (INEGI-CONAPO)

Entidad Federativa	Extensión territorial continental (miles de km ²)	Población 2003 (diciembre) (millones)	Densidad de población 2003 (hab/km ²)	Población 2010
Aguascalientes	5.6	1.02	182	1.13
Baja California	71.5	2.83	40	3.39
Baja California Sur	73.9	0.49	7	0.57
Campeche	57.7	0.76	13	0.84
Coahuila	151.4	2.49	16	2.71
Colima	5.6	0.58	104	0.63
Chiapas	73.7	4.33	59	4.73
Chihuahua	247.5	3.34	13	3.74
Distrito Federal	1.5	8.81	5 873	8.81
Durango	123.4	1.55	13	1.58
Guanajuato	30.6	5.01	164	5.25
Guerrero	63.6	3.25	51	3.30
Hidalgo	20.9	2.36	113	2.45
Jalisco	78.6	6.73	86	7.09
México	22.3	14.33	643	15.85
Michoacán	58.7	4.21	72	4.28
Morales	4.9	1.69	345	1.82
Nayarit	27.9	0.98	35	1.03
Nuevo León	64.2	4.15	65	4.58
Oaxaca	93.3	3.68	39	3.83
Puebla	34.3	5.45	159	5.82
Querétaro	11.7	1.56	133	1.75
Quintana Roo	42.5	1.04	24	1.30
San Luis Potosí	61.2	2.39	39	2.46
Sinaloa	57.3	2.74	48	2.89
Sonora	179.5	2.43	14	2.69
Tabasco	24.7	2.04	83	2.20
Tamaulipas	80.2	3.08	38	3.47
Tlaxcala	4.0	1.05	263	1.16
Veracruz	71.9	7.26	101	7.38
Yucatán	39.7	1.78	45	1.94
Zacatecas	75.4	1.42	19	1.42
Total	1 959.2	104.78	53	112 103 821

Acorde a la situación y proyección que señala el Cuadro anterior, en el país existirán zonas en las que se entrará en seria competencia por el agua para los diferentes usos (CNA, 2004). Véase Figura 3.2

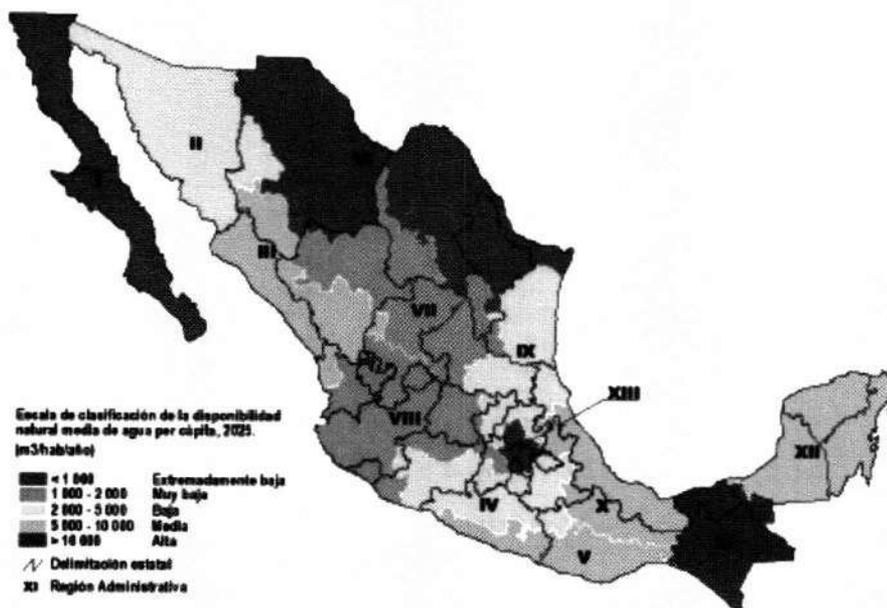


Figura 3.2: Regiones hidrológicas y disponibilidad de agua al año 2025. (Conapo 2005, CNA 2004).

De la Figura 3.2 se desprende que regiones como La Península de Baja California (Región I), Río Bravo (Región VI), Valle de México y Sistema Cutzamala (Región XIII), contarán al 2025 con disponibilidad media por habitante calificada como extremadamente baja oscilando de 156 a 833 m³ por habitante por año. De igual manera las regiones Noroeste (II), Balsas (IV) y Golfo Norte (IX), al 2025 su disponibilidad por habitante será calificada como Baja con alcance medio de 2400 a 4200 m³. El balance más detallado se ha analizado en el capítulo II.

En términos globales, el incremento poblacional ocasionará que la disponibilidad media de agua por habitante se reduzca de la cantidad actual a solo 3822 m³ por habitante por año.

Es un hecho también que la eficiencia de transformación agua – productos es intrínsecamente baja en los principales bienes de consumo (véase Cuadro 3.2). En este

sentido, la ciencia y tecnología tiene un campo fértil para el desarrollo de proyectos de investigación encaminados a incrementar la disponibilidad del agua y la eficiencia de uso.

Cuadro 3.2: Eficiencias de transformación de algunos productos (World Water Resources Institute, 2003)

PRODUCTO	AGUA NECESARIA PARA SU PRODUCCION (lts)
1 Naranja	350 – 416
1 Huevo	454 – 568
1Pieza de pan	1,135
1 Litro leche	500 – 3500
1 kilo carne	26,500
1 hamburguesa con papas	5,667
1 pantalon de algodón	6,813
1 camisa de algodón	1,514
El acero de un carro	121,120
El acero de una bicicleta de 13 kg de peso	1,816

Lo anterior pone de manifiesto que la degradación de los recursos naturales en varias partes del mundo y específicamente en los países en vías de desarrollo, ha adquirido proporciones seriamente alarmantes. Por ejemplo, la deforestación impacta la diversidad biológica alterando en clima global; la erosión de los suelos reduce la capacidad de satisfacer las crecientes demandas de alimentos, además, la deposición de sedimentos en obras de almacenamiento reduce la capacidad de extracción del vital líquido para diversos propósitos. Estos y otros problemas añadidos ejemplifican la vulnerabilidad inherente a nuestros recursos naturales.

En México, la disponibilidad de agua para los diferentes usos se encuentra en creciente deterioro por diferentes causas que se han mencionado en el capítulo I. Así, la Figura 3.3 muestra la disponibilidad relativa de agua en el país para dos fuentes: a) subterránea y b) Superficial.

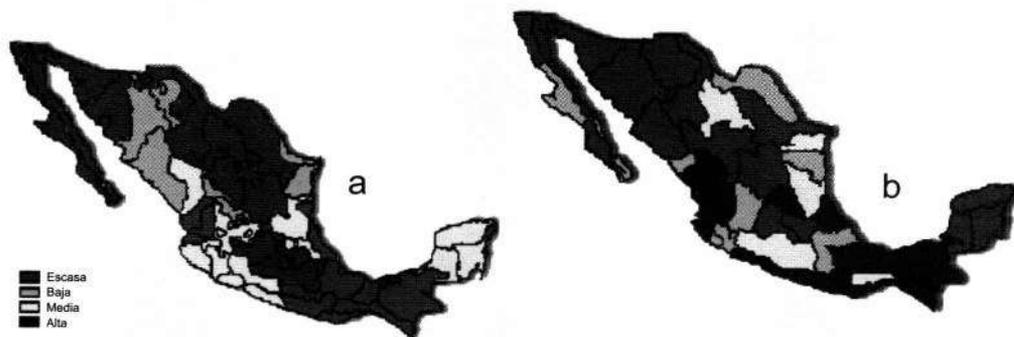


Figura 3.3: Disponibilidad de agua subterránea (a) y superficial (b) en México al año 1994 (CNA 2004)

3.1 Variabilidad climática

En agricultura, la incertidumbre se asocia con la variabilidad del clima pudiendo establecer que un sistema bajo incertidumbre climática, es un sistema bajo riesgo. El riesgo puede ser físico o económico sin ser ambos necesariamente excluyentes. De esta manera, no es conveniente utilizar la media aritmética de la precipitación como un indicativo del estado de variabilidad. Dado que la atmósfera es un sistema dinámico no lineal, en el sentido determinístico, no es fácil predecir su comportamiento. De aquí, que los métodos estadísticos sean de utilidad en el proceso de determinar el comportamiento futuro de las variables climatológicas que impactan a los ecosistemas.

En estos casos, las anomalías climáticas evalúan realmente el comportamiento del clima en términos de estabilidad o incertidumbre. Este parámetro contempla las desviaciones de la precipitación, por ejemplo, con respecto a la media histórica de esa variable lo cual es útil en virtud de que, para poder emitir juicios relativos a desastres climáticos, es necesario evaluar el comportamiento hacia ambos lados de la media. Por otro lado, para indexar a alguna región en términos de sequía, es necesario seguir estándares internacionales en aras de poder establecer comparaciones pertinentes.

Las anomalías de precipitación, escurrimiento ó alguna otra variable de interés, también llamadas anomalías estandarizadas en un contexto operacional (Wilks, 1995), permiten hacer juicios cualitativos acerca del comportamiento de una variable al consi-

derar que tanto se aparta el valor actual de su promedio. La ecuación 3.1 muestra la manera de calcular el índice de anomalía (*IA*):

$$IA = \frac{x - \bar{x}}{s_x} \quad 3.1$$

En términos de la ecuación 3.1, el primer paso para el cálculo del *IA* es calcular la diferencia entre el valor de la variable «*x*» y su promedio en el periodo de tiempo que se considere (diario, mensual anual, etc.) y dividirlo por la desviación estándar (s_x) que caracterizan las variaciones en el lapso de tiempo de interés

La Figura 3.4 señala las anomalías de la precipitación total anual en el mundo en la que se puede notar que ese valor para México ha sido estable en forma global manteniéndose en el rango de 0 a 10% de variaciones. Con lo que respecta a la temperatura, el índice de anomalía muestra que el planeta se está calentando sobretodo por la marcada tendencia de los últimos 50 años (Jones *et al*, 1998), véase Figura 3.5. El principal agente causante de este calentamiento es el incremento de bióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera debido a la quema de combustibles fósiles y a la deforestación principalmente. Existe demasiada controversia en las teorías acerca de los efectos que esto traerá; sin embargo, la teoría más congruente es que el fenómeno traerá como consecuencia un marcado incremento en el nivel del mar por los deshielos de los polos con el impacto en la circulación general del planeta. En términos de disponibilidad de agua al disminuir la temperatura de los océanos, los regímenes pluviales se verían afectados con periodos inciertos hacia la baja y en ocasiones con eventos extremos de presencia de lluvias.

Como se anotó también en el capítulo anterior, las anomalías estacionales de precipitación por región en el país, son mayores a las que señala la Figura 3.4. Así, la Figura 3.6 presenta las anomalías de precipitación en un gradiente de norte a sur en México para algunas estaciones climatológicas. Es pertinente señalar que los puntos por encima de la media histórica (señalada como “0” en la escala vertical), significan periodos de precipitación total anual mayores al promedio (las unidades son número de desviaciones estándar) y los eventos por debajo de la media histórica significan periodos de sequía. Así por ejemplo, la estación climatológica de Todos Santos en Baja California Sur, presenta mayor variabilidad que la estación de la Presa Abelardo Rodríguez en Chiapas indicando mayor incertidumbre y riesgo.

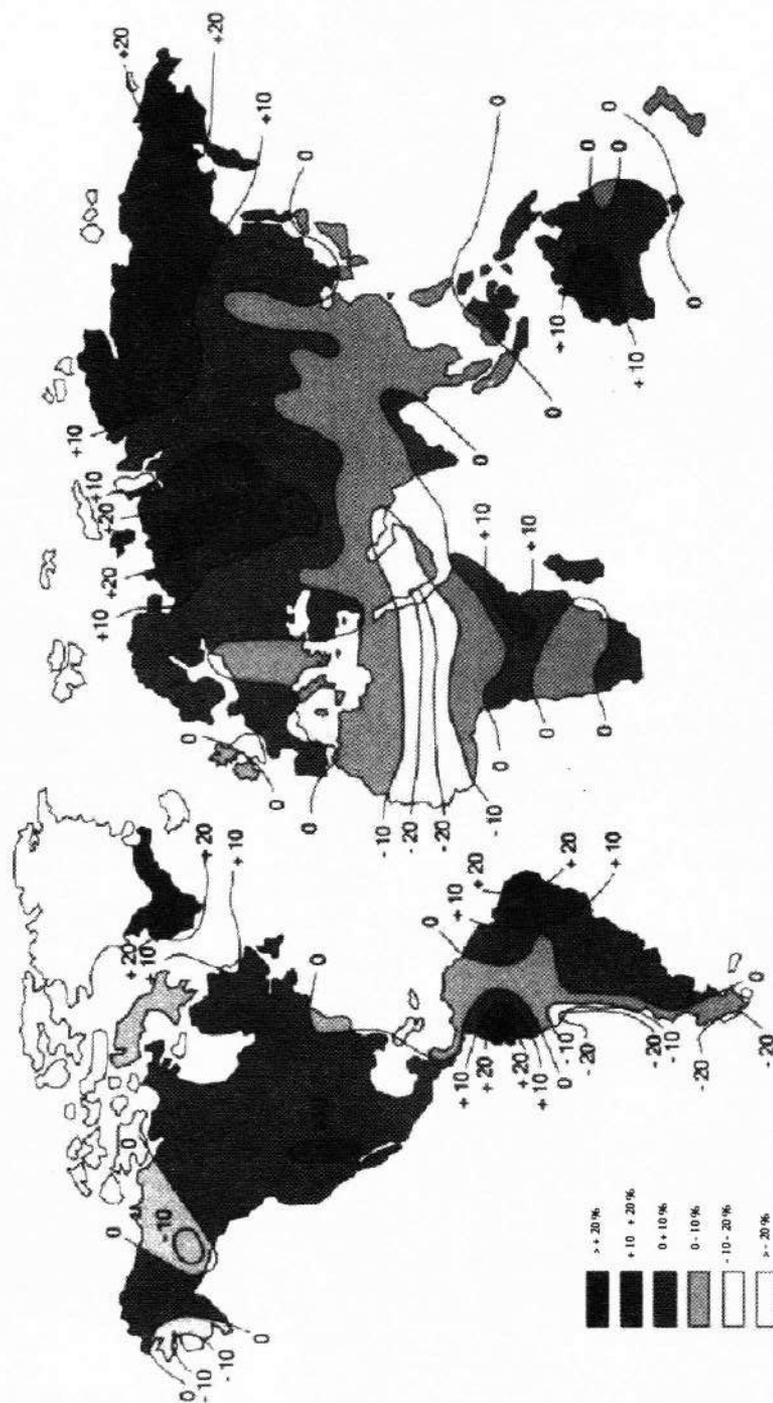


Figura 3.4: Anomalías de la precipitación (%) total anual en el mundo considerando el período de 1931 a 1990 (FAO, 1996)

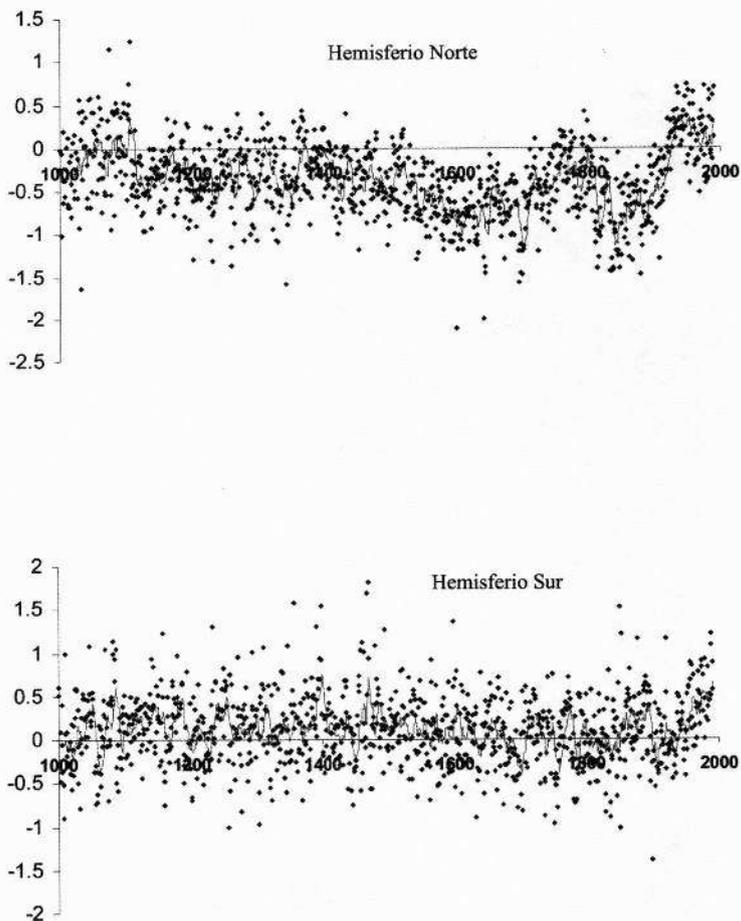


Figura 3.5: Anomalías de temperatura en los hemisferios. Reconstrucción de 1000 años (Reconstruido de Jones *et al*, 1998)

De éstas anomalías se puede notar también la periodicidad y magnitud de los ciclos húmedos y secos; así, la presencia de años extraordinarios en el norte es menos frecuente que en el sur sin embargo, la magnitud de estos (altura de los picos) cuando se presentan, es mayor que aquellos del sur. El Cuadro 3.3 muestra el impacto que los diferentes periodos secos ha tenido en la disponibilidad de agua en los estados del país.

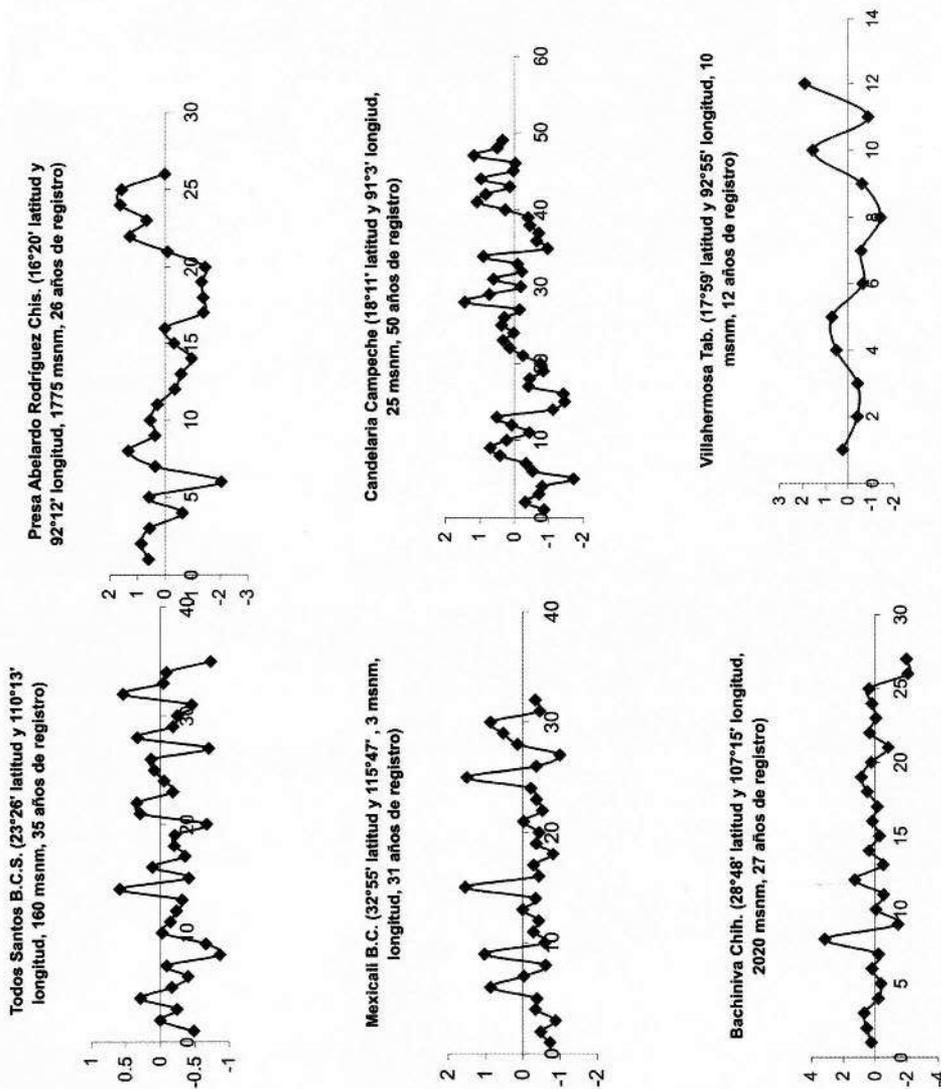


Figura 3.6: Anomalías de la precipitación anual en algunas estaciones de la República

Cuadro 3.3: Efecto de las sequías en los estados de México (CNA, 2004)

Periodo	de 1948 a 1954	De 1960 a 1964	de 1970 a 1978	de 1993 a1996
Aguascalientes	N	S	R	S
Baja California	R	S	R	S
Baja California Sur	R	S	R	S
Campeche	N	N	N	N
Coahuila	N	N	N	N
Colima	S	S	S	S
Chiapas	S	S	S	S
Chihuahua	N	N	N	R
Distrito Federal	N	R	N	S
Durango	R	S	S	S
Guanajuato	R	S	R	S
Guerrero	N	N	N	R
Hidalgo	R	S	S	S
Jalisco	N	R	N	R
México	N	R	R	S
Michoacán	N	N	N	R
Morelos	N	N	N	S
Nayarit	N	R	N	R
Nuevo León	S	S	S	S
Oaxaca	N	N	N	R
Puebla	N	R	R	S
Querétaro	R	S	S	S
Quintana Roo	N	N	N	N
San Luis Potosí	S	S	R	S
Sinaloa	R	S	R	S
Sonora	S	S	R	S
Tabasco	N	N	N	N
Tamaulipas	S	S	R	S
Tlaxcala	N	S	S	S
Veracruz	N	N	N	R
Yucatán	N	N	N	N
Zacatecas	R	S	R	S

S	Severa
R	Regular
N	Sin impacto

Las anomalías en los regímenes pluviales también pueden ser cuantificadas mediante el estudio de la magnitud de crecimiento de los anillos de ciertas especies arbóreas (de hecho esta metodología fue usada como aproximación para los datos que muestra la Figura 3.5 antes anotada); a esta tecnología se le conoce como “Dendrocronología”, (Villanueva *et al*, 2004). La aplicación de esta tecnología en México data de la década 1940 -1950 (Schulman, 1944; Schulman, 1956; Scott, 1966). Las cronologías de anillos

de árboles en México resultan particularmente importantes debido a que la mayoría de ellas correlacionan con la precipitación invernal y con índices del El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés). La Figura 3.7 muestra un ejemplo de reconstrucción de datos de precipitación para la región de Guanaceví en el estado de Durango.

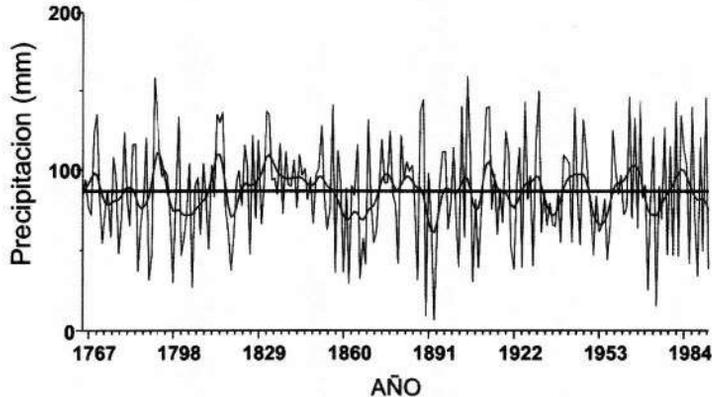


Figura 3.7: Reconstrucción de bases de datos de precipitación para Guanaceví, Dgo (Villanueva et al, 2004).

La Figura 3.8 muestra el impacto de la variación de la precipitación “A” (expresada como índice de anomalía), el coeficiente de escurrimiento “B”, sobre las aportaciones a la presa “C” (expresadas como índices de anomalía) y el área sembrada en el distrito de riego 017, “D”, en la Comarca Lagunera en los estados de Coahuila y Durango.

Como se puede observar, existe un efecto en cascada de las variaciones en la ocurrencia de precipitación en los diferentes ecosistemas que ocurren en cuencas hidrológicas. Este efecto es más marcado en ecosistemas áridos caracterizados por una gran aleatoriedad en sus variables climáticas (Sánchez, 1994). La Figura 3.9 muestra un ejemplo de dos variables climáticas (temperatura: máxima y mínima y precipitación) en diferentes distritos de riego del país: a) San Luis Rio Colorado, D.R.014, b) Culiacán Sinaloa D. R. 010 y c) La Antigua Veracruz D.R. 035. Los datos que presentan estas figuras son a su vez promedios de veinte años de registro. Nótese en la Figura 3.9 la estacionalidad de la precipitación.

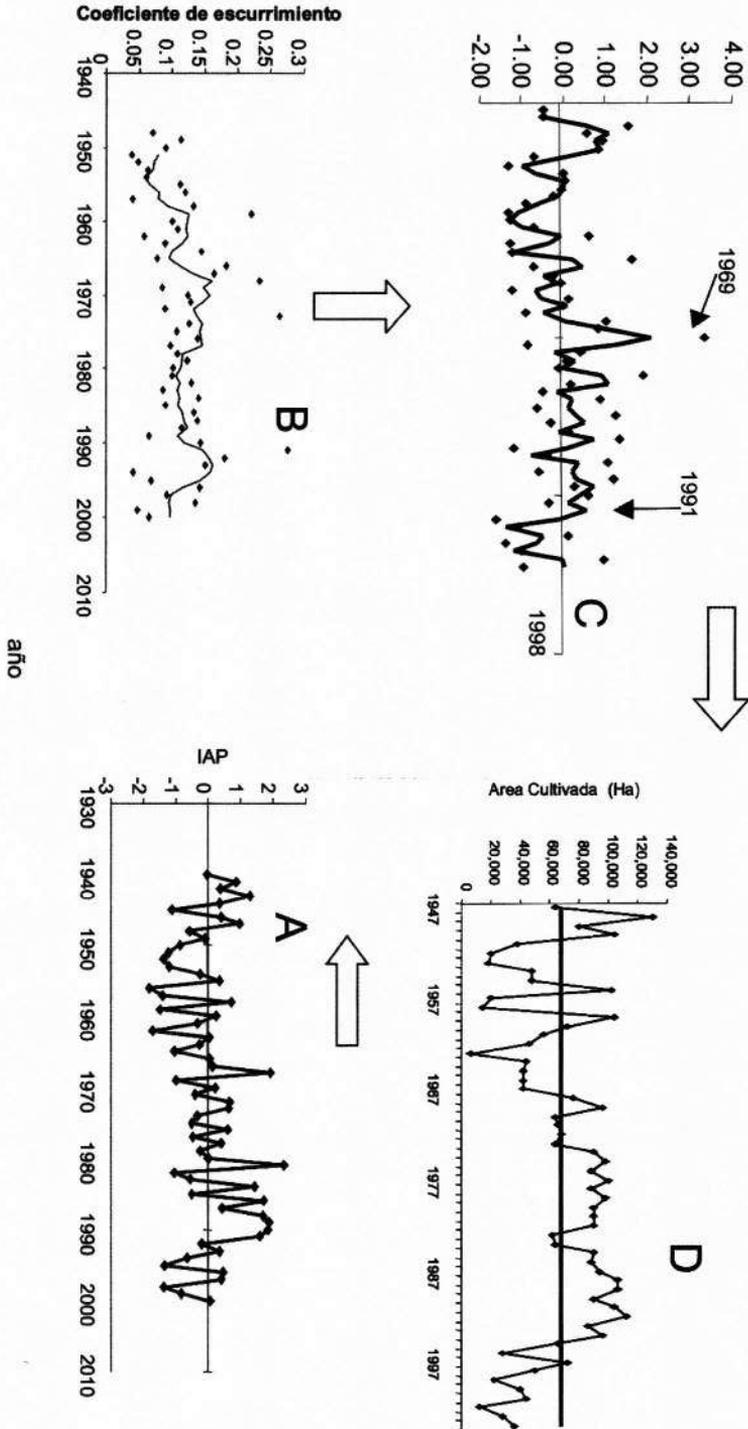


Figura 3.8: Impacto de la variación en la precipitación en el distrito de riego 017, Comarca Lagunera.

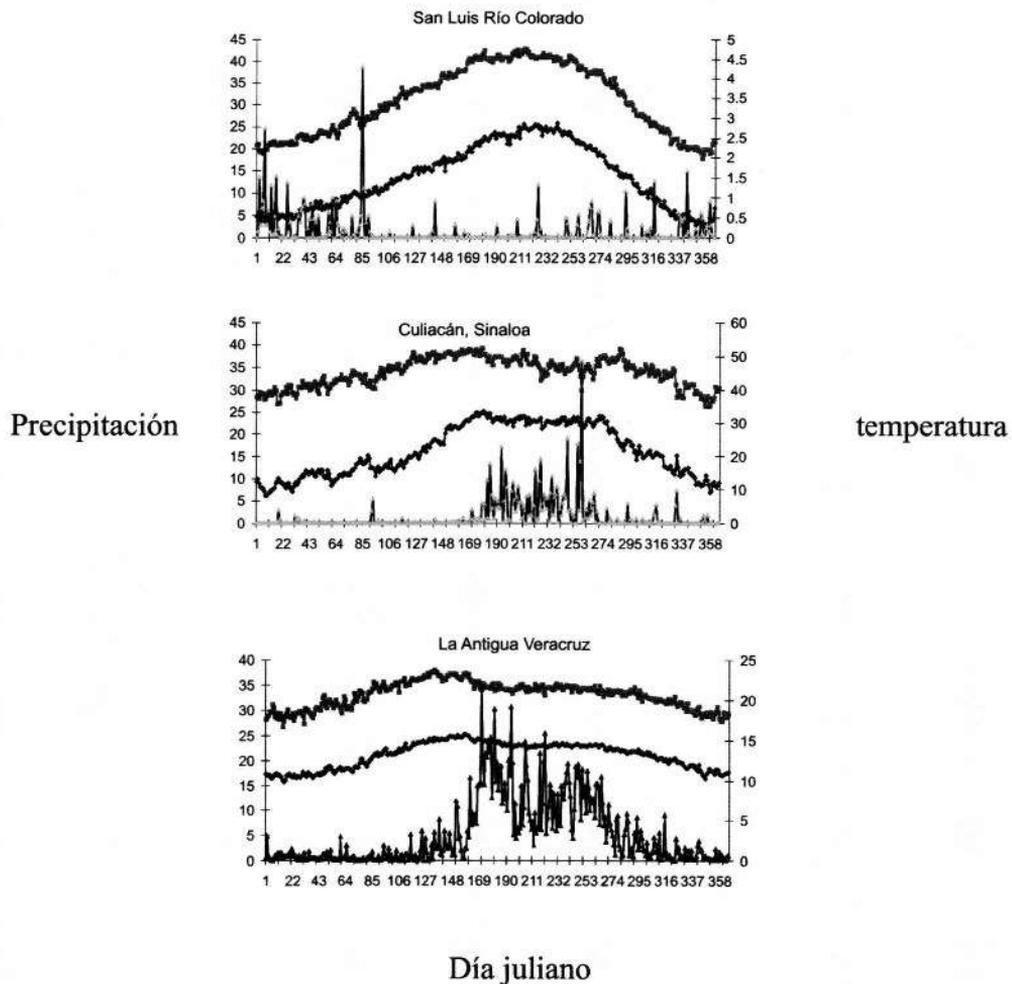


Figura 3.9: Estacionalidad de la precipitación en tres diferentes localidades en México.

Capítulo IV

Uso Potencial

En el capítulo anterior, se mencionó que en México, anualmente se utilizan 72 mil millones de metros cúbicos para satisfacer los diferentes usos. En esta estadística, la agricultura aparece como la actividad económica más demandante de este recurso natural. Sin embargo, el panorama que se vislumbra en el corto plazo para esta fuente de agua, no es muy alentador dado que al año 2003, 102 de los 653 acuíferos que se utilizan para actividades agropecuarias, se encuentran sobre explotados, es decir, se extrae mas agua por medio del bombeo comparado con la recarga natural, Figura 4.1 (CNA, 2004).

También de la totalidad de acuíferos del país, 17 cuentan con intrusión salina y 13 con el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres (CNA, 2004).

La tendencia de la sobre explotación de acuíferos es a la alta con una tasa promedio anual de 2.5 acuíferos como lo señala la Figura 4.2. Otro problema añadido a esta situación es la merma en la calidad del agua extraída ya que mientras mas sea la profundidad de bombeo existe el riesgo de que el agua extraída sea de mala calidad.

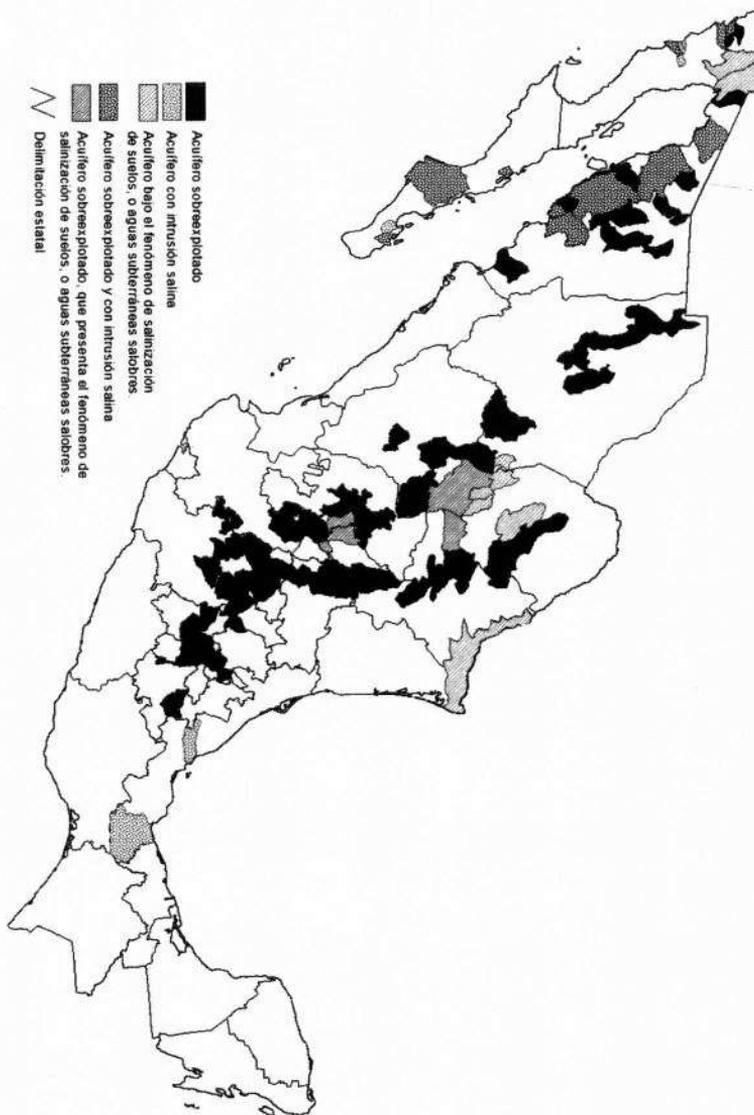


Figura 4.1: Acuíferos sobre explotados en el país. (CNA 2004)

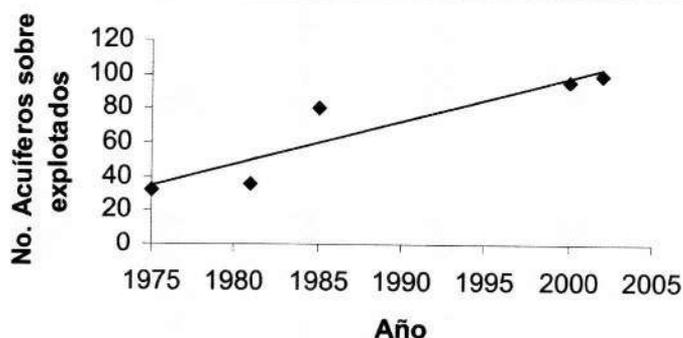


Figura 4.2: Tendencia a la sobre explotación de acuíferos en México, 2.5 por año.

4.1 El problema

Estos análisis ponen de manifiesto el problema por se “restricciones de agua para los diversos usos, por un lado y falta de control y pronóstico para los excesos”. Ante este panorama, se requieren de aproximaciones integradas que contemplen el uso y conservación de los recursos naturales en todo el gradiente hidrológico de las cuencas.

El panorama también puntualiza que en regiones agro ecológicas donde el recurso agua es limitante existe la imperiosa necesidad de adecuar su uso tratando de potenciar su productividad, de incrementar su valor agregado y / o de cambiar los esquemas productivos a aquellos con menor requerimiento de agua.

4.2 Modelación cartográfica

La información es la piedra angular de un proceso efectivo de toma de decisiones. La información concerniente al manejo de los recursos naturales es particularmente compleja puesto que requiere de dos descriptores: la ubicación precisa de lo que se quiere describir y una descripción clara de sus características físicas. Esto ha dado paso a la teoría del análisis espacial en la que la característica principal es que la información espacial es representada numéricamente en vez de forma análoga. Las relaciones espaciales de los datos se pueden manipular matemáticamente a lo que se conoce como procesamiento analítico.

La representación digital hace posible el procesamiento cualitativo y cuantitativo de la información lo que constituye una ventaja sobre la representación análoga. Esto conlleva a que la aplicación tome dos formas posibles: estadística espacial y modelación espacial.

Como se verá posteriormente, la modelación y simulación de procesos es una herramienta poderosa en el proceso de toma de decisiones. Cuando la información disponible (bases de datos) tiene documentada su posición en el espacio (georeferencia), se puede hacer uso entonces de algoritmos que consideren la distribución espacial de las variables. En este acometido, la modelación cartográfica ó cartografía digital asiste como la herramienta de más impacto.

4.2.1 Que es un Sistema de Información Geográfica (SIG)

La literatura contemporánea se refiere a un SIG como un sistema compuesto por partes tangibles (hardware), programas computacionales (software) y procedimientos diseñados para ayudar a la captura, manipulación, almacenamiento y despliegue de datos geo referenciados. Los SIG pueden ser usados para la solución de problemas complejos y en procesos de planeación y operación (Software Solutions, 2005).

En la Figura 4.3 se puede observar el flujo de información hacia dentro y fuera del sistema. Las entradas constituyen la información en diversos formatos (datos, mapas, atributos) y las salidas son los productos básicamente constituidos por mapas de atributos digitales. La tecnología ha evolucionado permitiendo que a manera de adquisición de datos pueda hacerse con scanner existiendo también la interacción con imágenes de satélite (Figura 4.4).

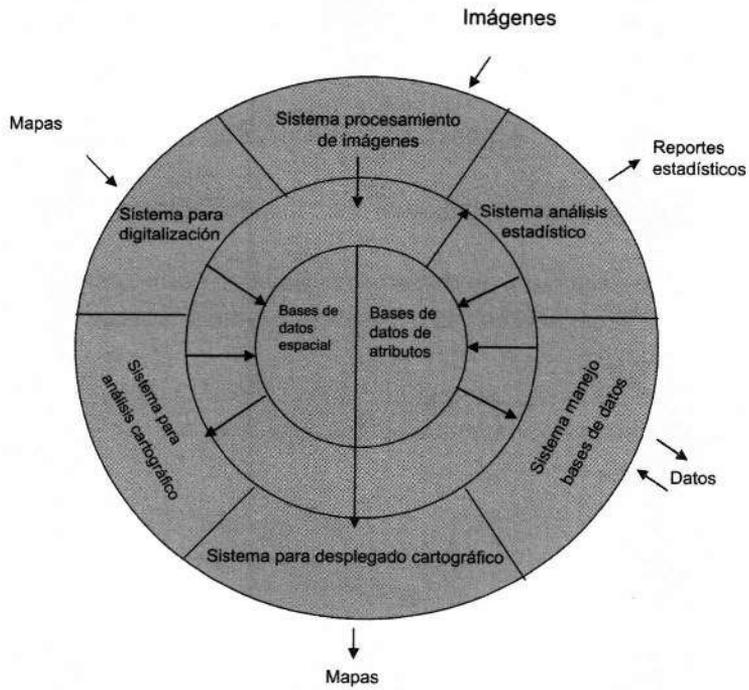


Figura 4.3: Componentes de un SIG y flujo de información

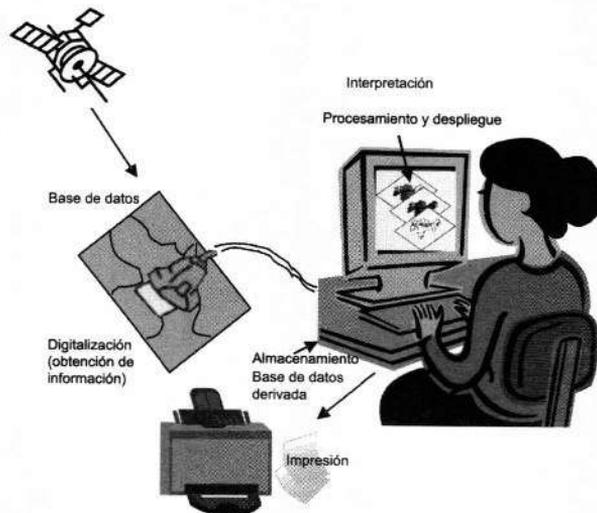


Figura 4.4: Procedimientos de adquisición, almacenamiento, análisis y despliegue de información

Como se puede observar, la parte medular del sistema es la Base de Datos conformada por dos elementos principales:

- a) Base de datos espacial: describe la forma y posición y
- b) Base de datos de atributos: describe las características

La manipulación de la base de datos por el sistema, permite derivar información (más base de datos) la cual a su vez sirve para interpretar la dinámica de los atributos.

En tratándose del manejo integral de los recursos naturales, la base de datos primaria está conformada principalmente por los siguientes elementos:

- Elevación
- Vegetación
- Suelos (propiedades físico químicas)
- Estructuras
- Divisiones políticas
- Propiedad
- Geomorfología
- Socio economía
- Variables climáticas (precipitación, radiación, temperaturas, humedad relativa)
- Caminos
- Etc.

La base de datos que se puede derivar de la combinación y análisis de los elementos anteriores es:

- Pendiente
- Dirección y proyección de la pendiente
- Cuencas y micro cuencas
- Potencial productivo
- Zonas buffer
- Accesibilidad, distancia
- Densidad (habitacional, vegetación)
- Etc.

Algunas interpretaciones de la manipulación de la información incluyen:

- Hábitat
- Mejor ruta
- Calendarización de cosecha
- Zonas potenciales para captación de agua
- Zonas en peligro (deforestación, incendios, etc)
- Tendencias
- Agrupación, Discretización
- Etc.

Las facilidades (utilities) de los SIG pueden variar en función del proveedor del sistema; sin embargo, existen términos estándares en el léxico de los SIG, el Cuadro 4.1 muestra algunas definiciones resumidas.

Cuadro 4.1: Algunas definiciones de términos comunes en SIG's

Vocablo	Definición
ASCII	Acrónimo "Código Americano Estándar para Intercambio de Información". En los SIG también se les conoce como archivos de Texto. El sistema usa grupos de 8 dígitos binarios que representan los números del 0 al 255. Cada número representa un carácter. Por ejemplo 65 representa la letra "A"; así cada carácter ASCII requiere un byte (8 bits) de memoria.
ATRIBUTO	La característica que se va a representar. Altura, uso del suelo y vegetación son ejemplos de atributos. Los atributos se almacenan como números; una imagen es una colección de atributos en formato rastrer.
ARCHIVO BINARIO	Formato en el que los números se almacenan en representación binaria. Son más eficientes que el código ASCII para el almacenamiento de datos numéricos.
IMAGEN BOOLEANA	Imagen donde el atributo de una celda solo puede ser entero (1 ó 0).
BYTE	Medición de almacenamiento digital. Un byte representa 8 bits. El almacenamiento de información se mide en kilobites (K). Un kilobite es 1024 byte. Así una computadora cuya memoria es de 256 K, contienen $(256 \times 1024) = 262,144$ bytes.
MODELO DIGITAL DE ELEVACION (DEM)	DEM se refiere a una imagen que contiene datos que se pueden definir como alturas en una superficie. Un caso especial son los modelos digitales de terreno (DTM) cuyas alturas son alturas sobre el nivel medio del mar.
RASTRER	Término usado para describir un sistema de imágenes compuestas de celdas pequeñas dispuestas en una red. El orden de almacenamiento de la imagen es en líneas progresivas de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.
SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)	El sistema GPS consiste en una serie de 24 satélites. Con este sistema se puede determinar las coordenadas que definen un punto en el espacio acorde a un sistema geodésico de referenciación.
INTERPOLACION	Proceso matemático mediante el cual se estima el valor de un punto desconocido basándose en valores conocidos alrededor de ese punto.
PIXEL	PIXEL es una contracción de las palabras "cuadro y elemento" (picture y element en inglés). Se refiere estrictamente a una porción (normalmente rectangular o cuadrada) de una imagen rastrer; por otro lado, una celda en datos rastrer se refiere a los valores que gobiernan la manera en que el píxel es desplegado.
POLIGONO	Se refiere a una área delimitada por líneas; estas a su vez consisten en pares de puntos, así, un polígono se almacena en un sistema vectorial como un listado de puntos (con coordenadas X y Y) con el último punto idéntico al primero.
RAM	Es una acronismo por Acceso a Memoria Aleatoria (Random Access Memory), es la memoria interna de la computadora disponible para almacenar programas y datos.
VECTOR	Técnicamente, un vector es una cantidad que tiene magnitud y dirección. El término se usa para nombrar todo dato gráfico que puede ser representado por puntos descritos por coordenadas absolutas (e.g., coordenadas X y Y); esto incluye puntos líneas y áreas.

Un SIG se puede conceptualizar como la sobreposición de mapas de las variables que interesan para un fin específico (Berry, 1994) por ejemplo, si es de interés encontrar aquellos lugares con precipitación mayor a 500 milímetros que además posea suelos adecuados para la agricultura y en donde la temperatura oscile entre 25 y 30 grados como media en los meses de verano, entonces debemos sobreponer los mapas de precipitación, tipo de suelo y temperatura para encontrar los lugares en donde se cumple exactamente con las condiciones impuestas.

4.2.2 ¿Como funciona un SIG?

Si los datos que se van a usar no están en forma digital, existen varias técnicas para su captura. Los mapas pueden ser digitalizados “a mano” utilizando el ratón de la computadora uniendo el contorno del mapa en la pantalla, ó mediante una mesa digitalizadora para levantar las coordenadas de los objetos. Los escáneres electrónicos pueden convertir también mapas a dígitos. La información de los Sistemas Globales de Posicionamiento (GPS) también pueden ser leídos por un SIG. (ver Figura 4.4)

Un modelo cartográfico es una representación gráfica de datos y procedimiento analíticos utilizados en un estudio. Su propósito es ayudar al analista a organizar y estructurar los procedimientos necesarios e identificar todos los datos necesarios para el estudio sirviendo también, como referencia para el análisis. Es muy recomendable que en el proceso del desarrollo de un modelo cartográfico se plasme en un diagrama (modelo) la secuencia lógica de pasos e información para llegar al producto final. Se recomienda empezar por el producto final y proceder hacia atrás en una manera de paso por paso hasta la base de datos existente. Así, el procedimiento empieza con la definición del producto final (Eastman, 1999): Figura 4.5

- ¿Qué valores tendrá el producto final?
- ¿Qué representan estos valores?
- ¿Qué datos son necesarios para producir el producto final?
- ¿Como se pueden obtener dichos datos?

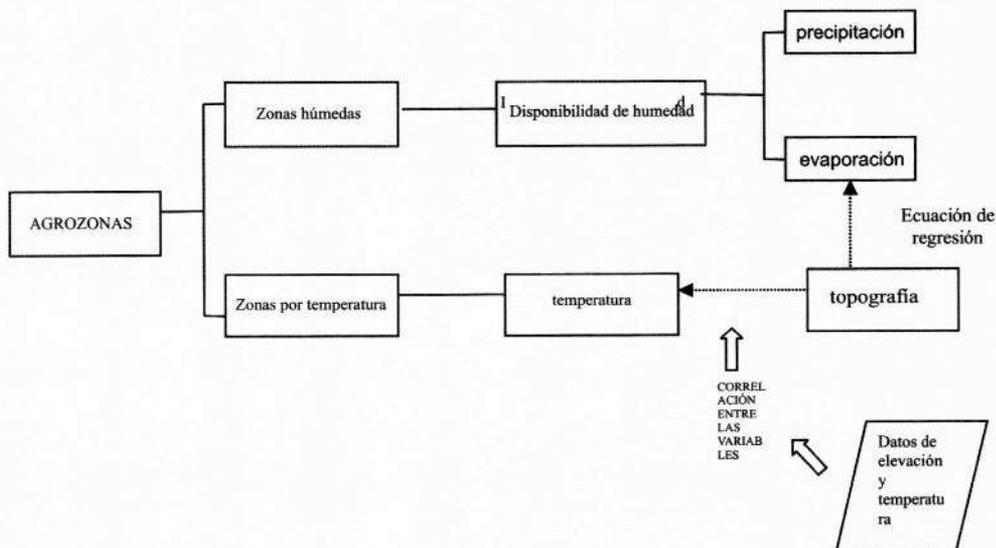


Figura 4.5: Ejemplo de modelo del proceso para selección de zonas potenciales

Como se ha asentado, los datos disponibles pudieran estar en forma digital o papel o inclusive datos tabulados que necesitarían estar en forma digital. Si los datos necesarios no estuvieran disponibles, sería necesario desarrollar una manera de inferirlos indirectamente mediante combinaciones de datos o substitutos.

La gran ventaja de los SIG esta en su habilidad de relacionar información diferente en un contexto espacial y llegar a una conclusión acerca de esta relación. Así, un SIG hace posible la asociación o integración de información que con otros métodos resultaría bastante complicado y tardado con poca precisión. De esta manera, un SIG puede usar combinaciones de variables en forma de mapas para obtener y analizar nuevas variables (Figura 4.6).

Las imágenes de satélite que han sido interpretadas por una computadora para producir, por ejemplo, un mapa de uso del suelo, puede ser leído en un GIS en forma de datos rastrear. Como se señala en la Figura 4.7a, este formato consiste en hileras de celdas uniformes codificadas acorde a los valores de los datos. Esta Figura señala un ejemplo en donde se muestra la estructura de un archivo rastrear y su homólogo en forma de vector. Este último consistente en una serie de puntos unidos por líneas. Los archivos rastrear, aunque son mas eficientemente manipulados por las computadoras, son menos detallados que los archivos tipo vector. Ambos presentan ventajas comparativas

en función de la aplicación que se trate.

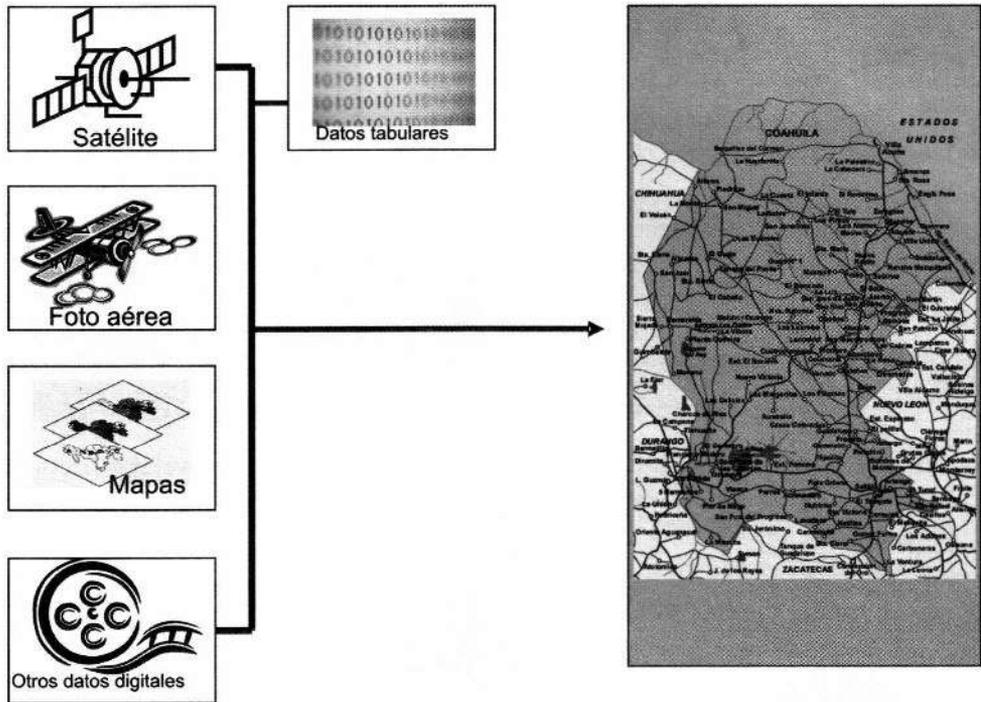


Figura 4.6: Combinación de diferentes estructuras de información para generar nuevas variables.

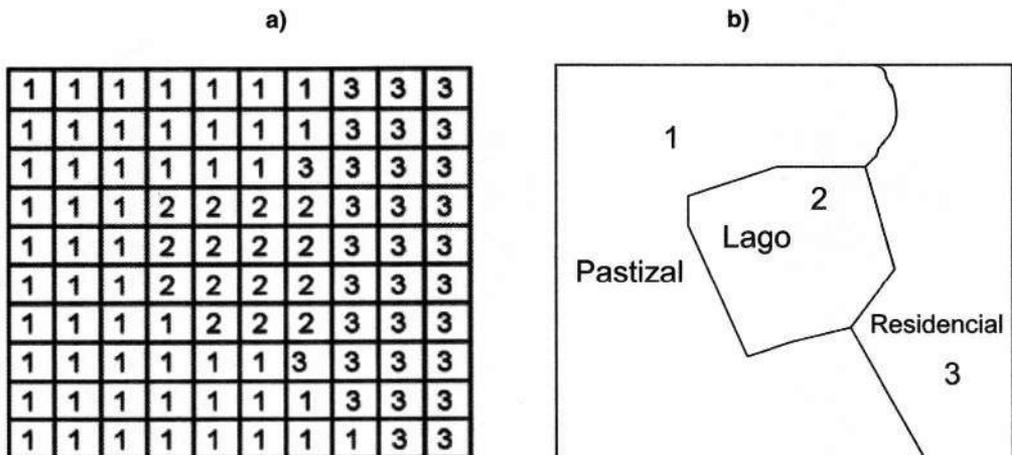


Figura 4.7: Estructura de datos rastrear (a) y vector (b)

Un SIG puede convertir una imagen de satélite a una estructura tipo vector por medio de la generación de líneas alrededor de las celdas con la misma categoría o clasificación (el mismo atributo) determinando las relaciones espaciales entre celdas (Figura 4.8).

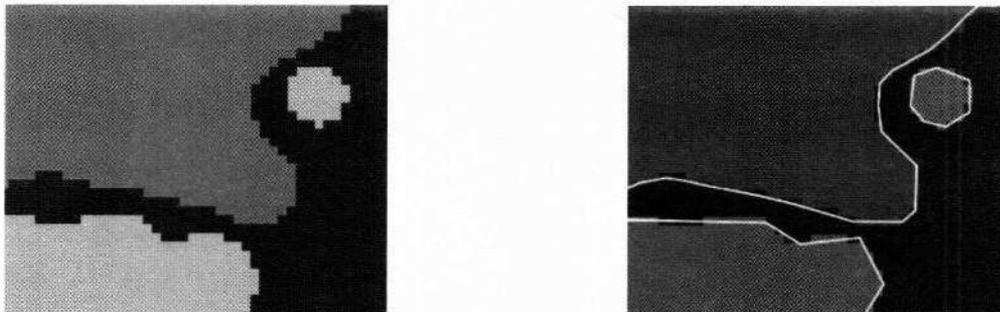


Figura 4.8 Vista ampliada de la base de datos en formato rastrer y la conversión a formato tipo vector (Adaptado de USGS, 2004)

Como se ha mencionado, una de las operaciones fundamentales del SIG es la búsqueda de información. Con la búsqueda en la base de datos, lo que se desea es tener básicamente respuesta a dos preguntas clave: 1) Búsqueda por localidad, es decir, ¿que hay en este punto? y 2) es la búsqueda por atributo, es decir, ¿donde se ubican todos los puntos que tienen este atributo? Para realizar una búsqueda por atributo, primero se especifica una condición y luego se le instruye al SIG que delimite todas las regiones que tienen esa condición. Si la condición involucra solo un atributo, la información (mapa) tiene que ser reclasificada para complementar la búsqueda. Si se tiene la condición de que se involucran varios atributos, se tendrán que utilizar álgebra booleana que combine, mediante una instrucción algebraica, diversos atributos para encontrar el producto final (Ball, 1992).

4.3 ¿Que es el potencial productivo y como se obtiene?

En tratándose de producción agrícola, los cultivos presentan diferentes necesidades climáticas que deben ser consideradas, junto con otros requerimientos, en los planes de reconversión. De las variables que impactan los niveles de producción, la precipitación es la de mayor relevancia ya que su ausencia es definitiva en la potencialidad de producción.

Un componente esencial en la búsqueda de alternativas que optimizan el uso del agua, es entonces la **reconversión productiva** hacia cultivos con menos requerimientos hídricos y con alto valor comercial. La estrategia es analizar en forma espacial los parámetros que definen el **potencial productivo** de las especies con la finalidad de discretizar áreas productivas. En este sentido, los SIG aunado a **modelos de simulación** de procesos, son una herramienta de significativo valor en la planificación agropecuaria de las regiones de interés. Para este acometido, existen diferentes SIG comerciales así como modelos de simulación.

El Cuadro 4.2 señala las necesidades de clima, suelo, topografía (pendiente) y altura sobre el nivel del mar necesario para que los diferentes cultivos se desarrollen y produzcan a su potencial. Cuando estos requerimientos se cumplen en su totalidad en una región para un cultivo de interés, se dice entonces que este cultivo rendirá a su máximo potencial si se mantienen bajo control las otras variables que inciden en su producción como las plagas, enfermedades, etc. Para fines de planeación y tratándose de conocer esa potencialidad en una región o país, el análisis debe de considerar como varían esos requerimientos a medida que la posición geográfica cambia de un lugar a otro en un estado, o en una región e inclusive de un país a otro. En forma práctica lo que realmente se debe de hacer es un balance entre oferta (lo que provee la naturaleza como las temperaturas, precipitación, tipo de suelo, etc) en función del lugar, y la demanda que es lo que requieren los cultivos (Sánchez, 1995).

La herramienta matemática que asiste en este procedimiento se conoce como álgebra booleana que sucintamente es la aplicación de procedimientos lógicos para obtener la respuesta buscada. Estos procedimientos lógicos pueden ser expresados como “falso/verdadero” ó también como la presencia o ausencia de un atributo ó como “sí/no”. En términos de cartografía computarizada, por convencionalismo estos atributos se presentan como mapas binarios expresados con valores de “1 y 0”.

El producto de una operación booleana se puede ejemplificar con el uso de “tablas de verdad” la cual es una representación gráfica de las posibles combinaciones usadas en este tipo de operaciones (Figura 4.9).

Cuadro 4.2. Requerimientos de clima y suelo para diferentes cultivos

CULTIVO	REQUERIMIENTOS DE SUELO					REQUERIMIENTOS DE CLIMA				
	ALTITUD (m.s.n.m.)	PROF. (m)	pH	PSND. (%)	TEXTURA	T. MAX. °C	T. MIN. °C	T. MED. °C	PRECIP. (mm)	
Malz	0 - 2800	> 0.60	5.5 - 7.5	0 - 15.0	Mediana y Fina	30	10	14 - 30	500 - 1200	
Tiogo	120 - 2800	> 0.50	5.5 - 8.2	0 - 8.0	Medio	30	5	15 - 20	500 - 1000	
Frijol	0 - 2400	> 0.40	5.3 - 7.5	0 - 8.0	Gruesa, Mediana y Fina	27	10	14 - 30	450 - 1200	
Cebada	1200 - 2800	> 0.30	6.5 - 8.0	0.0 - 15.0	Gruesa y Mediana	35	4	14 - 20	350 - 1000	
Café	1500 - 3000	> 0.50	6.0 - 7.5	0.5 - 1.0	Medio y Fina	35	4	15 - 18	400 - 800	
Soye	0 - 1800	> 0.60	6.0 - 7.0	0.0 - 3.0	Gruesa, Mediana y Fina	35	18	22 - 30	450 - 700	
Paño Bulco	1300 - 2800	> 0.30		< 16	Medio y Fina	22	4	12 - 18	800 - 1200	
Paño Estrella	0 - 1500	> 0.10		< 16	Gruesa, Mediana y Fina	35	10	20 - 31	> 800	
Paño Tinam	0 - 1500	> 0.10		< 16	Medio y Fina	35	10	20 - 31	> 800	
Avena Forrajera	1200 - 3000	> 0.40	4.5 - 7.5	0.0 - 8.0	Medio y Fina	30	5	14 - 20	400 - 1200	
Agave	1000 - 2500	> 1.0	7.0 - 7.5	0.0 - 15.0	Medio y Fina	35	10	25 - 30	800 - 1000	
Lima	0 - 1500	> 0.60	4.8 - 8.3	< 25	Medio y Fina	35	13	20 - 26	1000 - 2000	
Limon	0 - 1500	> 0.60	6.0 - 8.3	< 25	Gruesa, Mediana y Fina	36	10	20 - 26	800 - 1800	
Lichi	0 - 1000	> 0.60	5.0 - 7.0	< 5.0	Medio y Fina	40	15	18 - 28	800 - 2000	
Frambuesa	2000 - 3000	> 0.60	5.5 - 7.0	0.0 - 10.0	Medio y Fina	26	5	18 - 20	300 - 1700	
Zarzamora	1500 - 2500	> 1.0	5.3 - 7.8	0.0 - 6.0	Medio	22	5	16 - 18	500 - 1500	
Durazno	1300 - 2800	> 0.6	6.5 - 7.5	5.0 - 15.0	Medio y Fina	23	2	12 - 18	700 - 1800	
Higo	600 - 1800	> 1.0	4.3 - 8.6	0.0 - 8.0	Medio	38	4	17 - 19	500 - 1500	
Vd	0 - 2500	> 1.0	6.0 - 15.0	5.5 - 8.0	Gruesa y Mediana	35	10	25 - 30	400 - 1100	
Cebolla Blanca	2100 - 3100	> 1.0	6.5 - 7.5	0.0 - 30.0	Gruesa y Mediana	24	4	12 - 18	900 - 1600	
Cebolla Roja	0 - 1200	> 0.60		0 - 30		24	1	18 - 26	1000 - 2000	
Paño piloncillo	1400 - 3000	< 1.0	6.5 - 8.0	8.0 - 30.0	Medio	24	1	12 - 18	400 - 800	
Ajo	600 - 1800	> 0.40	5.0 - 7.5	< 0.2	Medio y Fina	30	8	18 - 22	450 - 1000	
Haba	1300 - 3000	> 0.25	4.2 - 8.6	0.0 - 10.0	Medio y Fina	28	5	16 - 18	700 - 800	
Juanca	0 - 1700	> 1.0	6.0 - 7.8	0.0 - 5.0	Medio	35	10	26 - 28	1100 - 2800	
Melón/Pulcero	1600 - 2800	> 0.30	6.0 - 8.0	0.0 - 35.0	Medio	25	11	12 - 20	400 - 1000	
Nopal Tinero	1300 - 2800	> 0.40	7.0 - 8.0	< 16	Gruesa, Mediana y Fina	30	4	15 - 22	400 - 800	

		Maíz					
		Y		O		NO	
		0	1	0	1	0	1
Suelo Arcilloso	0	0	0	0	0	0	1
	1	0	1	1	1	0	0

Maíz "Y" Suelo arcilloso: celdas en ambos mapas son verdaderas

Maíz "O" Suelo arcilloso: celdas en cualquier mapa son verdaderas

Maíz "NO" Suelo arcilloso. Celdas en el mapa de maíz son verdaderas y en suelo arcilloso son falsas

Figura 4.9: Matrices verdad para dos atributos: cultivo maíz y suelo arcilloso.

La Figura 4.9 señala la diferencia entre los operadores lógicos "Y", "O" y "NO". Esto se puede ejemplificar aún mas si se considera la sobre posición de mapas en los que un "visor" vertical rastrea cada celda de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha buscando los traslapes en los que coinciden las celdas verdaderas (atributo de "1") para asignarles un valor en el caso de que se use el operador "Y". En esta sobre posición en donde no hay traslape de celdas verdaderas, no se les asigna valor y no aparecen en el resultado final (Figura 4.10).

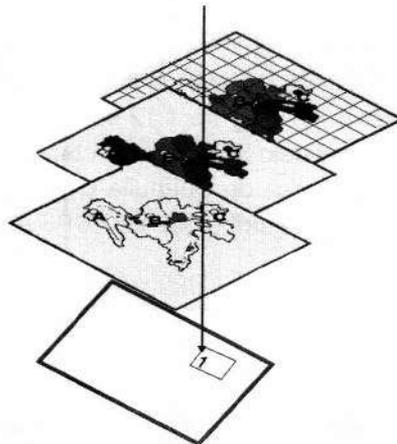


Figura 4.10: Proceso de asignación de valor o atributo en los SIG

La figura 4.11 muestra un modelo para la obtención del potencial productivo de maíz en México.

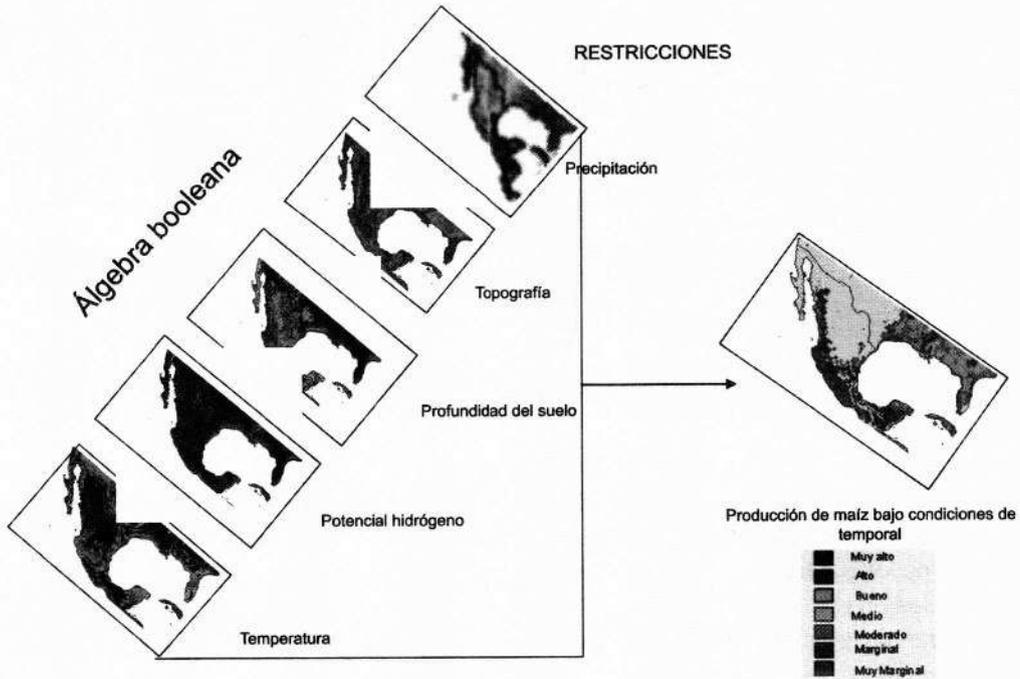


Figura 4.11: Modelo del potencial productivo para maíz en zonas de temporal en México.

Otro ejemplo de modelación cartográfica siguiendo el modelo conceptual que señala la Figura 4.10, se presenta en la figura 4.12 en la que Sánchez (1995) utilizó la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) para obtener el potencial de erosión en la Comarca Lagunera de los Estados de Coahuila y Durango utilizando el operador lógico "Y" (intersección de mapas de atributos). La EUPS es:

$$A = K.LS.C.P \quad 4.1$$

Donde A es la erosión del suelo en toneladas, K es un factor de erosividad del suelo función del contenido relativo de partículas primarias del suelo, materia orgánica, estructura y permeabilidad, L es un factor por la longitud de la pendiente, S por la inclinación de la pendiente, C un factor por cubierta vegetal y P factor por prácticas de manejo. Para una completa descripción del método véase la Guía para la Planeación y

Conservación con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo de los E.U.A. (Renard, *et al*, 1997)

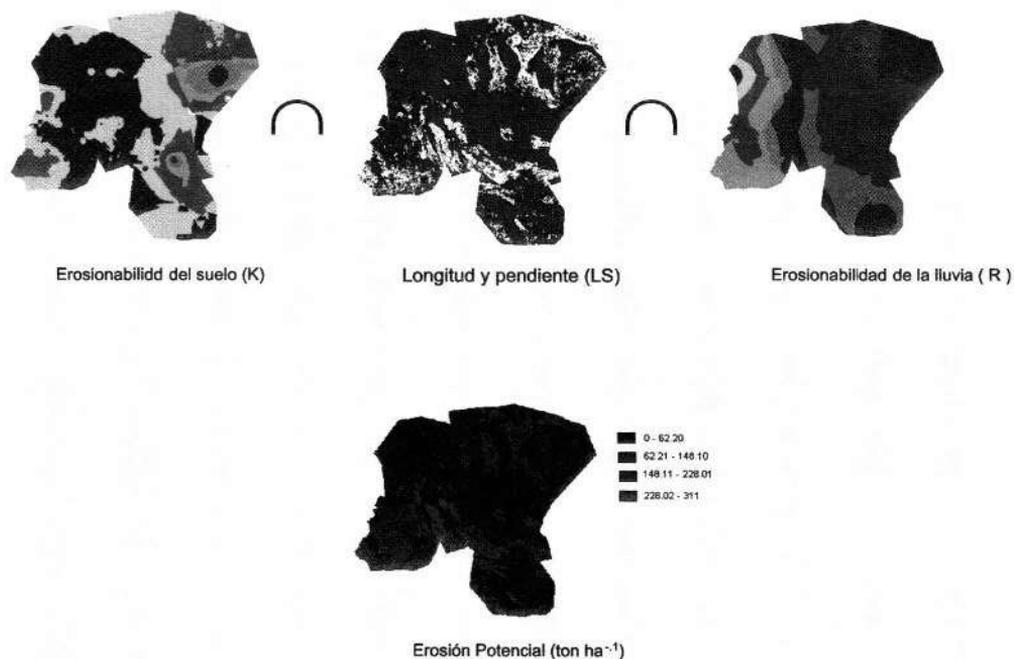


Figura 4.12: Modelación cartográfica de la erosión potencial en la Comarca Lagunera (Sánchez, 1995).

Los meta datos de la figura 4.12 son:

```

file title   : EROSION POTENCIAL COMARCA LAGUNERA (ton/ha)
data type    : integer
file type    : binary
columns      : 360
rows         : 360
ref. system  : lat/long
ref. units   : m
unit dist.   : 1.0000000
min. X       : -6300.0000000
max. X       : -6120.0000000
min. Y       : 1440.0000000
max. Y       : 1620.0000000
pos'n error  : unknown
resolution   : unknown
    
```

```
min. value : 0
max. value : 4
value units : unspecified
value error : unknown
flag value : none
flag def'n : none
legend cats : 5
category 0 :
category 1 : 0.01-62.20
category 2 : 62.21-145.10
category 3 : 145.11-228.01
category 4 : 228.02-311.0
```

Las operaciones que se realizan para la obtención del potencial productivo que señala las Figuras 4.11 y 4.12 consisten en una serie de reclasificaciones de los datos acorde a las restricciones de las variables involucradas. En este proceso se producen una serie de mapas “intermedios” ó “temporarios” con los que se realizan las operaciones escalares para producir el mapa buscado.

4.4 Estrategias para una modelación efectiva

Para empezar: no es lo mismo el manejo del software (operación mecánica), que la modelación utilizando el software; tampoco el objetivo de los SIG es la automatización de los procesos de cartografía. El uso de los SIG con propósitos de modelación cartográfica puede resultar una ardua tarea si no se tiene claro el producto que se desea encontrar. Esto es especialmente cierto para personas con poco conocimiento de los SIG quienes encuentran difícil recordar los procedimientos y al mismo tiempo diseñar un modelo realista y preciso; la consecuencia de esto es una desilusión en las expectativas del uso de los SIG por parte del usuario.

Acorde a Ball, (1992) los síntomas de la “parálisis de análisis” ó “ansiedad del modelador” son:

- Una inquietante iniciativa por incluir análisis detallados en el proyecto
- Inversión de bastante tiempo en la computadora sin resultados
- Necesidad de obtener “cualquier” respuesta cuanto antes

- Frustración por no obtener las respuestas a las preguntas que se le hacen al sistema.

Lo más recomendable ante la presencia de cualquiera de estos síntomas es abandonar el proyecto y consultar o comentar con colegas al respecto. La causa de esto es la falta de planeación desde el inicio. Cuando se empieza a construir un modelo cartográfico se necesita tener suficientemente claro el problema; de hecho, la mayoría de los problemas con los modeladores es la falta de entendimiento del problema básico. Generalmente el problema reside en una falla en la comprensión de los criterios. De aquí que es indispensable escribir las ideas (algoritmo) en forma de diagrama (modelo conceptual como lo señala la figura 4.5); de esta manera es fácil ubicar la residencia del problema. El principio detrás de esto es: si se sabe lo que se quiere, es fácil encontrar como obtenerlo; los modeladores conocen esto como "programación orientada a metas".

Para problemas complejos, la visión completa del problema y el consecuente desarrollo de una estrategia puede resultar difícil. En este caso la mejor estrategia es subdividir el problema en "pequeños problemas" o componentes; este es el método de aproximación en la modelación de ecosistemas (Berry, 1993, CGIAR, 2000).

Para modelar algo tan complejo como un ecosistema, el problema es subdividido en los procesos que lo componen como: hidrología, migración animal, etc. La manera en que se construyen los diferentes modelos y como se interconectan sus productos, requieren de profundo análisis del modelador. Sin embargo, se deberá evitar resolver todas complejidades de cada componente pues se perdería el objeto del modelo. La mejor estrategia es construir el modelo en etapas que se añaden al concepto del problema general. En cada etapa se definen los componentes con más detalle hasta que finalmente se llega a un modelo conceptual que puede producir las respuestas esperadas.

Toda vez que se ha establecido el plan inicial para la construcción del modelo se deberá hacer el balance de la información necesaria y la disponible determinando su calidad.

4.5 SIG y Modelos de Simulación

La integración completa de modelos de simulación a Sistemas de Información Geográfica no ha sido lograda del todo. Los SIG siguen siendo usados como obtentores de parámetros regionales los cuales son después exportados a modelos de simulación. Así entonces, las dos aproximaciones han sido usadas en forma separada. La ventaja es solo que las salidas de modelos de simulación son representadas como atributos locales en mapas en pantalla. La literatura menciona dos aproximaciones con las que modelos de Simulación y SIG pueden trabajar:

a) Cuando existe una interfase entre el SIG y los modelos de simulación

Aquí, los parámetros del modelo de simulación son exportados o leídos del SIG. Posteriormente, los resultados son exportados de nuevo al SIG pudiéndose ver en pantalla.

b) Cuando el modelo es integrado completamente en el SIG teniendo acceso a base de datos que son convertidos a imágenes, (Stuart y Stocks, 1993).

Ejemplos del uso de las aproximaciones arriba anotadas varían desde simple regionalización (i.e. McKimmey y Scott 1992) hasta el uso de interfaces entre SIG-modelos de simulación (i.e. Sweeney et al. 1993, Smith 1993).

Obviamente la segunda aproximación es la más deseada pero, este proceso no es común de manera genérica. Sin embargo, existen SIG diseñados ex profeso para cumplir objetivos específicos disciplinarios en donde los modelos de simulación están integrados al sistema geográfico.

La vinculación entre el GIS y modelos de simulación en general consiste en obtener mapas (distribución en el espacio) de los diferentes parámetros que componen a un determinado modelo de simulación. Por medio de operaciones escalares (afectar una imagen por una constante) o de transformación (afectar una imagen por logaritmos raíces cuadradas, etc.), se llevarían a cabo los cálculos pertinentes. Cada mapa creado dentro de un SIG tiene una tabla asociada a él; ésta tabla (valores asociados a cada celda) es la que se usa como base de datos para modelación. Una vez que se tienen la base de datos de parámetros distribuidos el siguiente paso es entablar combinaciones de parámetros. La partición espacial de un área en unidades sobre las cuales un modelo puede ser aplicado, es obtenida por medio de la sobre posición de mapas que contienen

los parámetros requeridos por el modelo. El mapa resultante puede ser particionado en cientos de pequeñas áreas donde cada una de las cuales contiene una combinación única de variables provenientes de los mapas de los que fue creado. Este mapa se le llama «mapa de condiciones únicas».

Las tablas (base de datos) asociadas a los mapas de condiciones únicas, son usadas para el modelado de procesos puesto que cada celda contiene una única combinación de parámetros producto de operaciones booleanas, escalares o de transformación. El siguiente paso es adjudicar a cada variable del modelo él o los mapas que les corresponden y realizar las operaciones pertinentes.

Por ejemplo, el cómputo del escurrimiento superficial es basado en modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés). Algunas versiones de SIG involucran subrutinas que determinan las direcciones de flujo dado una malla o red de celdas. Con esta información se pueden obtener posteriormente un mapa que adjudique vectores de velocidad por celda en función de la pendiente. Así entonces, una aproximación ha sido la de analizar la pendiente de 8 celdas que rodean a una celda central y en función de esto establecer cuales celdas contribuyen con escurrimiento a la celda de donde se «visualizan» las 8 celdas circundantes, (Maidment 1993, Smith 1993).

Procesos bidimensionales y distribuidos espacialmente tales como infiltración y precipitación pueden ser modelados usando el esquema de red mientras que el escurrimiento pudiera ser calculado celda a celda aguas abajo hasta encontrar la celda a la salida de la cuenca. En esta aproximación es necesario el desarrollo de subrutinas que lean archivos ASCII (tablas asociadas a imágenes) y que hagan la interfase con modelos hidrológicos de simulación.

La sistematización (y por ende el modelado) del calculo entre mapas mediante el uso de archivos BATCH haciendo uso del editor interno del SIG o cualquier otro editor o procesador de palabras acelera el proceso de cómputo minimiza el error humano.

Capítulo V

Simulación de procesos

5.1 ¿Por que simular y modelar?

La simulación de procesos es una actividad con la cual el usuario puede obtener conclusiones relativas al comportamiento de un sistema dado por medio del estudio de un modelo cuya relación causa-efecto es la misma (o similar) a la del sistema original. Así entonces, la simulación se circunscribe al desarrollo y uso de modelos que describen realísticamente el comportamiento de un sistema.

La acción de «simular» y «modelar» cualquier evento que ocurra en la naturaleza es una herramienta que prácticamente empezó su auge durante la Segunda Guerra Mundial, y ha alcanzado su máxima expresión durante la última década con el advenimiento de las supercomputadoras. En este período se ha tratado de representar matemáticamente (modelación) fenómenos naturales en los que, si las relaciones que componen al fenómeno son simples, se usan métodos matemáticos para la solución al problema planteado a lo que se denomina «solución analítica». Sin embargo, la mayoría de los sistemas encontrados comúnmente en la naturaleza son demasiado complejos para poder evaluarse analíticamente, por lo que las técnicas de simulación ofrecen como mejor opción la solución numérica (Law y Kelton, 1982).

Las razones del porqué utilizar la simulación de procesos para la solución de problemas se pudieran agrupar en dos grandes categorías: 1) como herramienta de investigación y 2) como herramienta para el soporte de decisiones. En el primer caso, la simulación de procesos asiste en el entendimiento (y quizás cuantificación) *ex-ante* de las relaciones funcionales entre variables de interés, con la finalidad de dirigir el esfuerzo y los recursos de investigación de manera certera. En el segundo caso, la simulación de procesos pretende auxiliar al tomador de decisiones en cuanto a la evaluación del efecto de una determinada acción sobre el sistema en estudio.

Muchos modelos han sido desarrollados para auxiliar a los modeladores y tomadores de decisiones a entender la operación de diversos sistemas y proveer un pronóstico del comportamiento futuro bajo ciertas condiciones de manejo; tal pronóstico puede realizarse con respecto a tiempo real (pronóstico, comúnmente asociado con la reconstrucción del pasado) o sin ningún tiempo específico de referencia (predicción, a menudo asociado con la construcción del futuro) (Wilks, 1995). Esta jerarquización ubica al problema en el tiempo, mientras que una segunda jerarquización sería ubicar al problema en el espacio al considerar la variabilidad espacial y la regionalización. En hidrología, las relaciones matemáticas que describen a un fenómeno son frecuentemente dependientes de la escala en el sentido de que diversas relaciones se manifiestan en diversas escalas de espacio y tiempo. La ciencia se ocupa actualmente de identificar y formular relaciones apropiadas a las escalas de interés práctico, probarlas experimentalmente y buscar conexiones analíticas consistentes entre estas relaciones y otras a diferentes escalas.

5.2 Secuencia para estudios de Simulación

La gran mayoría de los modelos de simulación relativos al uso racional del agua para uso agropecuario carecen de usuarios por diversas causas entre las que destacan el costo excesivo de su aplicación y el no haber considerado a los usuarios potenciales en su formulación. La Figura 5.1 muestra una serie de pasos que han de observarse para la conducción de un estudio que involucre simulación de procesos. Diversos autores han propuesto secuencias similares, (Por ejemplo, Law y Kelton, 1982) la que aquí se presenta es la de Banks, J. 1998. Los pasos a seguir se describen a continuación:

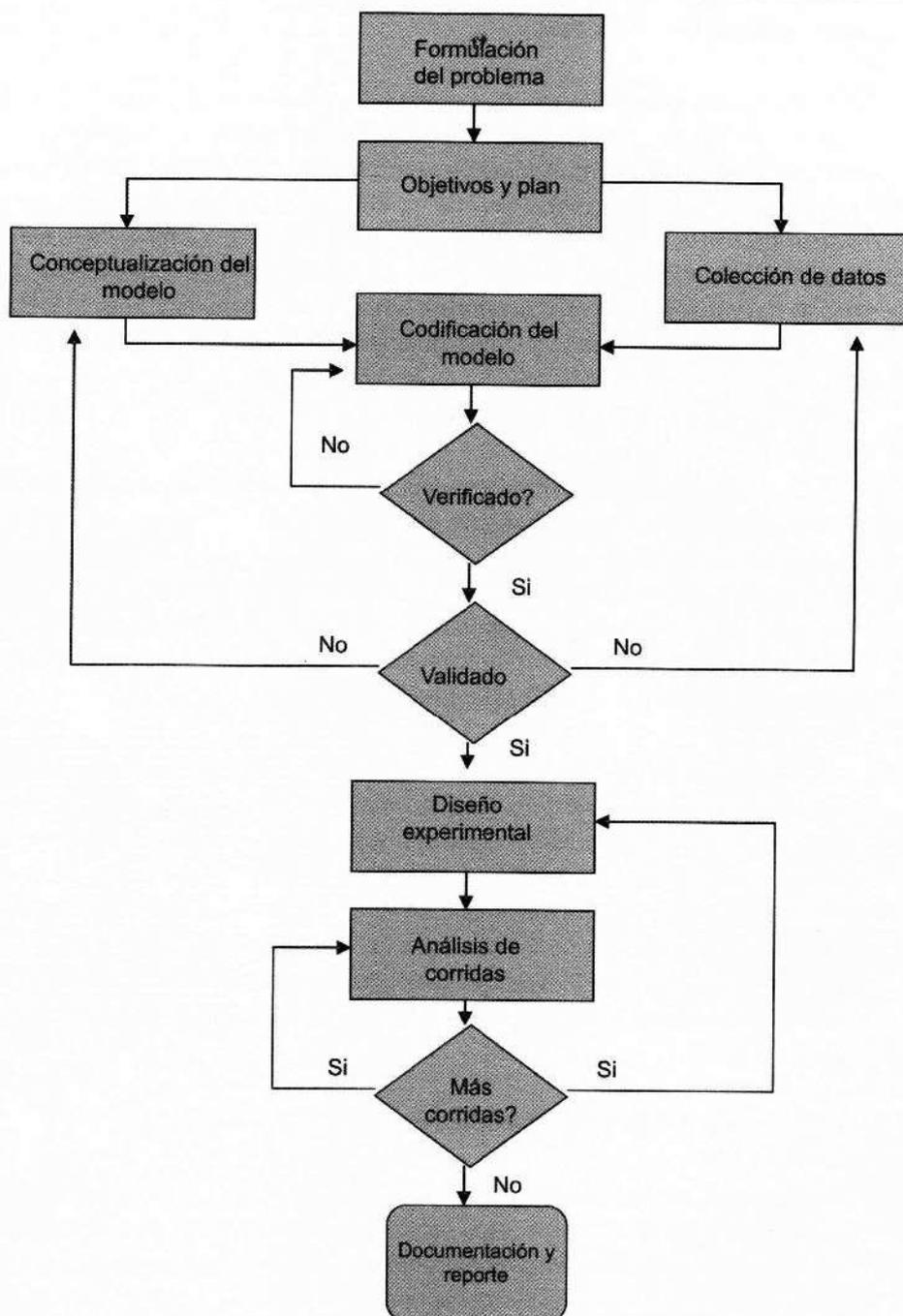


Figura 5.1 Seguimiento para la construcción de un modelo de simulación

- Formulación del problema

Cada estudio de simulación empieza con la descripción del problema. Si la descripción se realiza por el usuario directo (el que tiene el problema), el investigador o técnico deberá tener el cuidado suficiente de entender bien el problema. Por otra parte, si el investigador y / o el técnico son los que formulan el problema, el usuario deberá estar de acuerdo con la secuencia lógica del planteamiento del mismo y de sus asunciones. **Aquí es pertinente mencionar que no hay situación tan improductiva como plantear una buena solución a un problema mal entendido** por lo que en la formulación del problema deberán observarse los siguientes puntos:

- Seleccionar el grupo interdisciplinario

En el caso específico de problemas relacionados a la disponibilidad de agua para uso agropecuario es deseable que el grupo incluya a: especialista en uso y manejo del agua, un experto en climatología, especialista en física de suelos, experto en fisiología del agua, programador de computadoras, un especialista en sociología rural, y un representante de los usuarios potenciales.

- Iniciar las sesiones de trabajo con expectativas.

Las expectativas de los usuarios potenciales son las que normarán el seguimiento en la formulación del problema y deberán traerse a luz continuamente. Por ejemplo, la expectativa de los usuarios pudiera ser evadir el riesgo implícito a la agricultura de temporal por lo que el modelo deberá ser capaz de ofrecer alternativas técnicas para definir que sembrar y cuando o quizá proponer dimensiones de obras de captación del agua de lluvia. Es necesario contemplar en este paso la situación de aversión al riesgo en términos económicos en virtud de que la solución técnica al problema pudiera estar fuera del alcance de los usuarios.

- Obtener información de los usuarios estratégicamente.

Es muy común que la persona formulando el modelo para solucionar el problema sesgue el objetivo del modelo acorde a su especialidad, por lo que la labor del equipo interdisciplinario es centrar el objetivo al problema planteado considerando la información del marco de referencia. En este sentido, considerando el mismo ejemplo de disponibilidad de agua para uso agropecuario, una pregunta pobremente planteada a los usuarios sería: ¿su sistema productivo funciona

de manera adecuada?; por otro lado se obtendría mejor información si la pregunta fuera: ¿qué aspectos de su sistema productivo necesitan ser atendidos y por que?

- Predecir la solución.

Al inicio del proyecto se debe solicitar a los usuarios que realicen un rápido análisis del problema; con esto se logra concentrarse mas en el problema que en el modelo lo que provee de claridad en algunos aspectos que pudieran permanecer oscuros y se pudiera vislumbrar una posible solución. También se evitan ideas preconcebidas que restringen el universo de soluciones. Otra ventaja de este paso es que una vez que se obtiene la solución real al problema, se tiene un punto de comparación de la solución inicial planteada y la real pudiendo entonces establecer cuestionamientos que llevarían a un entendimiento mas profundo del sistema.

- Establecer los objetivos y el plan para el desarrollo del modelo.

Los objetivos indican las preguntas que deben ser contestadas por el estudio de simulación. Así, el proyecto deberá incluir una descripción de los posibles escenarios que serán estudiados. Los planes para el desarrollo del estudio deben incluir los tiempos necesarios para desarrollar cada paso, el personal necesario así como las necesidades de *hardware* y *software*.

- Conceptualización del modelo.

En esta etapa el sistema real a ser modelado debe de abstraerse en un modelo conceptual el cual consiste en una serie de relaciones matemáticas y lógicas concernientes a los componentes y la estructura del sistema. En esta etapa se recomienda empezar con un modelo simplista que crezca en complejidad conforme el objetivo lo requiera. También, es recomendable realizar diagramas de flujo que indiquen la secuencia lógica de las operaciones que realizará el modelo. Es pertinente mantener en mente la información disponible (base de datos) cuando se seleccionen las funciones matemáticas que describen las relaciones entre variables así, como se verá mas adelante, se puede elegir entre la construcción de un modelo simplista empírico o un modelo físicamente basado que requerirá de cierta información para cuantificar sus parámetros; de hecho, los vacíos de conocimiento son la justificación para el planteamiento de proyectos de investigación.

- Colección de datos.

Toda vez que el método de aproximación ha sido seleccionado y su estructura ha sido consensuada en el seno del equipo de trabajo, es necesario el asentar el tipo de datos o información necesaria para el modelo. Muy comúnmente la información no se encuentra en el formato requerido ni con la periodicidad deseada; por ejemplo, en la simulación del balance hídrico en un sistema de captación de agua es necesario el contar con datos de precipitación con base diaria; si no se cuenta con esta información se debe proceder al uso de generadores de clima los cuales requieren de estadísticos primarios para su parametrización.

- Codificación del modelo.

En este paso el modelo conceptual construido se codifica en un lenguaje computacional, o es transformado a *lenguaje máquina*. Esto constituye el modelo operacional.

- Verificación del modelo.

En esta etapa se confirma si el modelo trabaja adecuadamente acorde a lo planeado, es decir, se verifica que el modelo operacional refleje con precisión el modelo conceptual. Es muy recomendable que la verificación se realice como un proceso continuo y no esperar hasta que el código este completo para dar inicio a la verificación. Esto da la ventaja de detectar errores de lógica u omisión en etapas tempranas del desarrollo. Los siguientes puntos son recomendables en esta etapa:

- Seguir los principios de programación estructural.

Es pertinente dividir el modelo en sub módulos o sub rutinas para tener la facilidad de acceso y de entendimiento del diagrama de flujo. También, esta característica facilita el proceso de compilación del lenguaje fuente.

- Documentar el código tanto como sea posible.

Incluir comentarios entre las líneas de código indicando que realizará el modelo de ese punto en adelante hasta que el próximo comentario aparezca. Este proceso facilita que los usuarios del modelo entiendan los procesos o etapas en las que el código esta dividido. También, auxilia si el código necesita ser reeditado o expandido en sus capacidades.

- Revisión del código por mas de una persona.

Este es un paso que propicia claridad en la secuencia lógica del modelo operacional y garantiza una estructura de código entendible.

- Inspeccionar que los datos de entrada serán usados correctamente.

Por ejemplo si la precipitación estará dada en milímetros, la estructura numérica del modelo de escurrimiento deberá considerar esta información para que exista congruencia entre unidades. Es pertinente recalcar que las unidades universales de reporte son el sistema métrico decimal.

- Validación.

Es el proceso de comparar las salidas del modelo con salidas observadas en el sistema real en concordancia con las condiciones teóricas con las que el modelo fue desarrollado.

Este apartado comprende cuatro pasos importantes:

- Verificación: constatar que el programa computacional realice las acciones para las que fue desarrollado.

- Identificación de parámetros: consiste en usar el modelo computacional y base de datos para la obtención de los valores de los parámetros.

- Determinación de parámetros: es el proceso de establecer relaciones entre parámetros y variables medibles.

- Análisis de sensibilidad: es el proceso de identificar aquellos parámetros o entradas al modelo que repercuten sensiblemente en las salidas.

- Diseño experimental.

Es necesario preestablecer el número de simulaciones necesarias para obtener información de los escenarios hipotéticos que serán evaluados; también, se debe fijar

de que manera serán inicializadas las corridas. Esta etapa de diseño básicamente consiste en encontrar las combinaciones de variables o parámetros que serán evaluadas en un experimento utilizando el modelo de simulación. Así, los resultados (salidas del modelo) analiza la relación entrada – salida del experimento para derivar conclusiones relativas a la importancia de las variables. El análisis de sensibilidad del modelo involucra el diseño de un experimento en donde se definen que variables y en que magnitud se variarán como entradas al modelo para definir su peso relativo en las salidas del modelo y así poder identificar aquellas variables que por sí mismas merecen mayor atención en su cuantificación. La parte medular del estudio es entonces el análisis de varianza de los resultados o la obtención de la ecuación de regresión.

5.3 Métodos de aproximación

En hidrología, existen diversas clasificaciones que agrupan a los modelos de escurrimiento acorde a su estructura matemática y objetivo (véase Figura 5.2). Sin embargo, se pudiera establecer dos aproximaciones fundamentalmente diferentes en el «arte» de modelar: 1) aproximación física, basada en procesos y 2) aproximación empírica o modelos de caja negra. La aproximación física se fundamenta en el requerimiento para describir los sistemas en términos de leyes fundamentales o principios teóricos de la ciencia. Esta aproximación científica provee el potencial para describir los mecanismos relevantes que controlan el sistema, la naturaleza de sus interacciones y su variabilidad temporal y espacial (Singh y Kumar 1993).

La aproximación es compleja y en general la descripción de la dinámica del sistema involucra el uso de ecuaciones diferenciales no lineales, las cuales se solucionan por métodos numéricos. Los parámetros en esta aproximación tienen significado físico representando características tales como: dimensión, velocidad o temperatura, que pueden medirse en el contexto de sistemas reales. La aplicación de estos modelos requiere que las condiciones iniciales y de frontera que describen el estado inicial del sistema sean especificadas. Se deberá tener cuidado de aplicar el modelo dentro del rango de las asunciones consideradas para su desarrollo.

La aproximación empírica trata de describir el sistema en términos de relaciones estadísticas o relaciones empíricas. Estos modelos pueden variar en complejidad, desde simples ecuaciones que involucran un solo parámetro, el cual por sí mismo representa un índice del efecto neto de un rango de características y procesos promediados o integrados en espacio y tiempo, a ecuaciones más complejas que involucran más

parámetros. A diferencia de los modelos físicos, los modelos empíricos proveen poca o nula información relacionada a los mecanismos internos del sistema (Singh, 1996).

La aplicación de modelos empíricos está limitada por dos condiciones: 1) su aplicabilidad se restringe a las condiciones en las que los parámetros fueron calibrados y 2) no pueden utilizarse para explorar la operación interna del sistema físico que tratan de describir. Los modelos físicos y modelos empíricos pueden subdividirse en: modelos deductivos (determinísticos) o inductivos (probabilísticos). Se dice que el proceso y su modelo son determinísticos si se ignora la probabilidad de ocurrencia de las variables que describen el proceso y el modelo sigue una ley definida de certidumbre (pero no una ley probabilística). En cambio, si se considera la probabilidad de ocurrencia de las variables y los conceptos de probabilidad se consideran cuando se formula el modelo, el proceso y su modelo son descritos como estocásticos (dependiente del tiempo) ó probabilístico (no dependiente del tiempo).

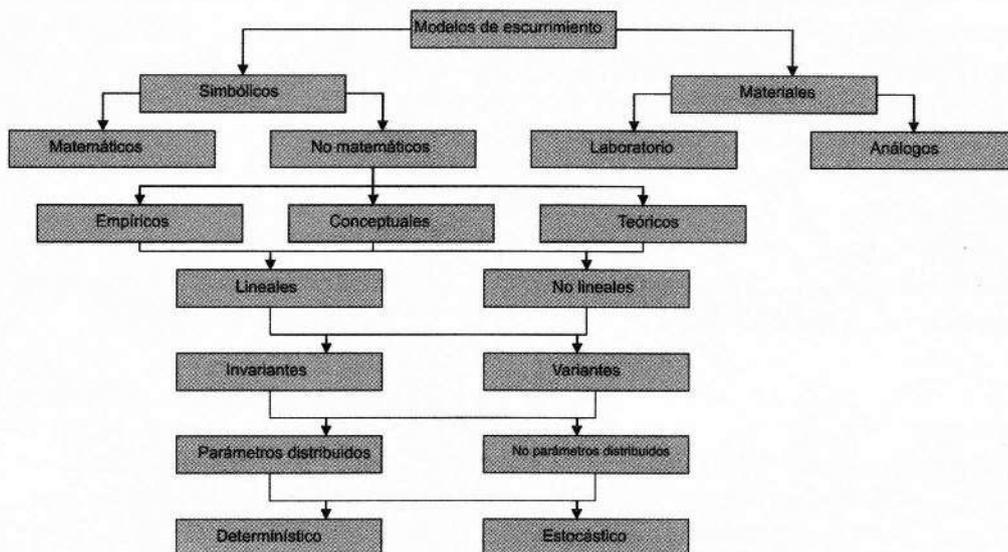


Figura 5.2: Agrupación de modelos acorde a su estructura y objetivo

Para procesos probabilísticos no dependientes del tiempo, la secuencia de ocurrencia de las variables involucradas en el proceso se ignora y se asume que la probabilidad de su ocurrencia sigue una distribución definida de probabilidad en la cual las variables se consideran puramente aleatorias (Haan, 1982).

Para procesos estocásticos dependientes del tiempo se toma en cuenta la se-

cuencia de ocurrencia de las variables, las cuales pueden ser puramente aleatorias o no aleatorias y su distribución de probabilidad puede variar o no en el tiempo (condición de estacionalidad o no estacionalidad). En las variables puramente aleatorias los miembros de las series de tiempo son independientes, constituyendo por esto una secuencia aleatoria. En las variables no aleatorias los miembros de las series de tiempo son dependientes entre ellos y poseen un componente determinístico y un componente aleatorio, constituyendo una secuencia no aleatoria.

Un método intermedio entre modelos estocásticos y determinísticos lo constituye la aproximación paramétrica, la cual se define como el desarrollo y análisis de relaciones funcionales entre parámetros físicos involucrados en eventos hidrológicos para su uso en la generación o sintetización de información hidrológica (Gottfried, 1984). El proceso de discernir qué tipo de aproximación usar queda circunscrito a la cantidad de información disponible. En tal virtud, si el modelador carece de gran parte de la información necesaria relativa a las relaciones causa-efecto del fenómeno en estudio, deberá considerar las características hidrológicas como eventos estocásticos. Si por el contrario, el modelador cuenta con bastante información de la relación causa-efecto, deberá considerar las características hidrológicas como consecuencias únicas de la situación.

El caso real entre estas dos posiciones contrastantes lo constituye el hecho de que frecuentemente se posee «alguna» noción de la relación causa-efecto de tal manera que no se está en una posición netamente estocástica. Sin embargo, tampoco se posee la totalidad de la información requerida como para someterse a lo riguroso del determinismo quedando entonces en la posición de la hidrología paramétrica.

La Figura 5.3 señala un ejemplo resumido del seguimiento para la construcción de un modelo de simulación del balance de agua para el diseño de obras de captación del agua de lluvia en donde el suelo es utilizado como almacén. El modelo que se describe se ubica en la categoría de *modelo matemático, empírico, no lineal, variante en tiempo, de parámetros no distribuidos y estocásticos* (Sánchez *et al.* 1997 y Sánchez, 1994).

5.4 Fundamentos estadísticos

La simulación de procesos requiere de un conocimiento secular de elementos de estadística en aras de poder explicar la aleatoriedad o comportamiento de las variables. Así, la estadística en conjunción con la programación son elementos esenciales en este proceso.

El uso de leyes de probabilidad y estadística es parte integral en los estudios de simulación, de tal manera que cualquier proyecto de investigación o desarrollo en este contexto deberá incluir un especialista en la materia. Así por ejemplo, ésta herramienta es particularmente útil en la elección de la función probabilística de distribución que represente el fenómeno de estudio en cuestión, en la generación de variables aleatorias que representen dicha distribución, en la validación de modelos de simulación, en el análisis estadístico de los datos arrojados por el modelo usado y en el diseño de experimentos de donde se obtendrá información para parametrizar los modelos.

Es pertinente recalcar que los modelos de simulación no deben ser utilizados con propósitos de predicción en el estricto sentido de la palabra. En tal virtud, la ciencia tiene aún muchas interrogantes por contestar y más preguntas por hacer. Los modelos de simulación ofrecen su mejor bondad en el auxilio del proceso de toma de decisiones. De ahí, que los conceptos de probabilidad y estadística sean parte fundamental en cualquier estudio de simulación.

Definición de parámetros estadísticos

La estadística se refiere a cálculos realizados de una muestra la cual sintetiza sus características importantes y los parámetros estadísticos son los que definen las características de la población (Kirkby *et al.* 1992). Un parámetro estadístico es el valor esperado «E» de la función de una variable aleatoria, siendo la media \bar{x} , un parámetro simple, el valor esperado de una variable aleatoria. Para una variable «X», la media es $E(X)$, la cual es el producto de «x» y la correspondiente función de densidad $f(x)$ integrada en el rango de valores posibles de la variable:

$$E(X) = \mu = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad 5.1$$

A la $E(x)$ se le denomina el **primer momento** del origen de la variable aleatoria, el cual es una medida de tendencia central de la distribución. El estimador de la media de la muestra es:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 5.2$$

El **segundo momento** está definido por la varianza como:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad 5.3$$

La desviación estándar, σ , es una medida de la variabilidad (dispersión alrededor de la media) de los datos, siendo la raíz cuadrada de la varianza; así, el coeficiente de variación es una medición adimensional de la variabilidad:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \text{ estimado por } \frac{s}{x} \quad 5.4$$

El **tercer momento** lo constituye el coeficiente de sesgo (coeficiente de asimetría) como:

$$E(x - \mu)^3 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x) dx \quad 5.5$$

Si la ecuación 5.5 se divide por la desviación estándar a una potencia de 3 (σ^3) se obtiene el coeficiente de sesgo en forma adimensional, cuyo estimador muestral es:

$$CS = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)s^3} \quad 5.6$$

El método de momentos se utiliza en el ajuste de datos a funciones de distribución.

En el anexo III aparece el código fuente de un programa computacional escrito en FORTRAN 77, que calcula los parámetros antes descritos. El programa ejecutable lleva por nombre «PARAM».

Análisis de información

Los procesos hidrológicos varían en espacio y tiempo de una manera tal que son parcialmente predecibles o determinísticos y parcialmente aleatorios. A tales procesos se les denomina estocásticos. Así pues, en hidrología y ramas afines el usuario trata con fenómenos inciertos.

La definición clásica de probabilidad encontrada en la mayoría de los libros de texto *expofeso* pudiera acoplarse a la hidrología de la siguiente manera: si un evento aleatorio ocurre « n » veces y el evento tiene un atributo « A » en « n_a » veces, se dice entonces que la probabilidad de ocurrencia de éste evento está dado por: (Haan, 1982)

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_a}{n} \quad 5.7$$

La ecuación 5.7 permite estimar probabilidades basadas en observaciones y no requiere que las salidas sean igualmente probables, aunque las probabilidades calculadas sean empíricas y sólo converjan estocásticamente con la verdadera probabilidad a medida que el número de observaciones se incrementa.

La estimación de probabilidades debe seguir ciertos principios:

- **Probabilidad total:** Si el espacio muestral ω se divide en « m » áreas no traslapadas B_1, B_2, \dots, B_m , luego entonces:

$$P(B_1) + P(B_2) + \dots + P(B_m) = P(\omega) = 1 \quad 5.8$$

Si B_1, B_2, \dots, B_m representan eventos mutuamente excluyentes, la probabilidad de que ocurra otro evento A estará dado por:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i)P(B_i) \quad 5.9$$

-Complementariedad: Si A es el complemento de A , es decir $A = \omega - A$, entonces:

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A) \quad 5.10$$

-Probabilidad condicional: Cuando existen dos eventos, i.e. A y B , su traslape está dado por $A \cap B$ (probabilidad de que el evento A y el evento B ocurrirán simultáneamente). Si $P(B|A)$ es la probabilidad condicional de que el evento B ocurrirá dado que el evento A ha ocurrido, entonces la probabilidad conjunta que A y B ocurrirán, $P(A \cap B)$, es el producto de $P(B|A)$ y la probabilidad de que el evento A ocurra, luego entonces:

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad 5.11$$

Si la ocurrencia de B no depende de la ocurrencia de A , se dice que los eventos son independientes siendo $P(B|A) = P(B)$, así:

$$P(A \cap B) = P(A)P(B) \quad 5.12$$

Teorema de Bayes

Un método ampliamente usado en hidrología para la incorporación de información a las probabilidades ya calculadas (probabilidad anterior) se conoce como probabilidad Bayesiana o Teorema de Bayes. La nueva probabilidad así obtenida (probabilidad condicional) se conoce como probabilidad posterior. Así entonces, la ecuación 5.11 se puede escribir de la forma: (Sellers y Mc.Guffie, 1987)

$$P(A)P(B_j|A) = P(B_j)P(A|B_j) \quad 5.13$$

incorporando el teorema de probabilidad total (ecuación 5.9), se tiene:

$$P(B_j|A) = \frac{P(B_j)P(A|B_j)}{\sum_{i=1}^m P(A|B_i)P(B_i)} \quad 5.14$$

La ecuación 5.14 constituye la base para estudios de probabilidad condicionada a eventos que ya han ocurrido.

Funciones de probabilidad y frecuencia

Si un número «n» de observaciones siguen una misma distribución, éstas pueden agruparse en forma de un histograma de frecuencias. De manera general, tres pasos son esenciales para la construcción de un histograma: (Haan, 1982)

- 1) Dividir el rango de las observaciones (el rango se refiere a la diferencia entre la observación mayor y la menor) entre el número deseado de intervalos.
- 2) El número resultante del paso anterior debe ser redondeado y constituye la amplitud de los intervalos de clase.

3) El límite inferior del primer intervalo de clase debe ser tal que la observación menor quede incluida en él. También se debe evitar que alguna observación se ubique en medio de dos subintervalos.

Frecuencia relativa y frecuencia acumulada: Si el número de observaciones « n_i » en el intervalo « i » y en el rango $(x_i - \Delta x, x_i)$ se divide por el número total de observaciones « n » el resultado se conoce como frecuencia relativa expresado como:

$$f_s(x_i) = \frac{n_i}{n} \quad 5.15$$

lo que constituye una estimación de la probabilidad de que la variable « X » se ubique en el intervalo $(x_i - \Delta x, x_i)$.

La sumatoria de varias frecuencias relativas resulta en el concepto de frecuencia acumulada expresada como:

$$F_s(x_i) = \sum_{j=1}^i f_s(x_j) \quad 5.16$$

lo que constituye una estimación de la probabilidad de que la variable « X » adquiera un valor menor o igual a x_i .

En el límite, las funciones de frecuencia anteriores para la población se obtienen mediante: cuando Δx tiende a 0.

$$f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f_s(x)}{\Delta x} \quad 5.17$$

La función de frecuencia acumulada se convierte en función de distribución probabilística como:

$$F(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} F_n(x) \quad 5.18$$

cuya derivada es la función probabilística de densidad:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad 5.19$$

5.5 Generación de números aleatorios

Como se analizará en capítulos subsecuentes, los estudios de simulación que contemplen variación aleatoria, deberán involucrar generación de variables aleatorias de la distribución probabilística que corresponda. Por ejemplo, el tiempo entre eventos de precipitación (tiempo de arribo) y la cantidad de precipitación, siguen una distribución del tipo exponencial (Karnieli y Fogel, 1987). Luego entonces, para la obtención de datos sintéticos de precipitación, se deberá generar números aleatorios para ésta función.

Distribución Básica

En realidad, los números generados no son aleatorios por completo puesto que se generan por métodos determinísticos; de cualquier manera, los números así generados satisfacen las pruebas para comprobar su aleatoriedad pero deberá considerárseles como números seudo aleatorios.

La distribución base para la generación de números aleatorios (seudo) es la **uniforme** en un intervalo $[0,1]$ comúnmente referida en la literatura como **U[0,1]**. Aunque la distribución uniforme es la más simple, es muy importante que los números con la característica $U[0,1]$ sean adecuadamente obtenidos ya que diferentes variables aleatorias de otras distribuciones son transformaciones de ésta distribución.

El generador de números aleatorios eficiente deberá contener las siguientes características: (Azarnag y Dunna, 1996)

- **Aleatoriedad:** Los números deberán «parecer» distribuidos uniformemente en el rango $[0,1]$ sin mostrar ninguna correlación entre ellos. Una prueba sencilla para determinar si esto se cumple es que el valor medio de una serie de números uniformemente distribuidos en el rango $[0,1]$ deberá ser 0.5 y la desviación estándar deberá ser el recíproco de la raíz cuadrada de 12, esto es 0.0288.

- **Periodicidad larga:** Puesto que los generadores de números aleatorios se basan en el uso de fórmulas determinísticas, los números empezaran a repetirse cada determinada secuencia. A la longitud de la secuencia se le denomina el **periodo** y es deseable que éste sea tan largo como sea posible. Por ejemplo, un modelo de simulación que actualice sus parámetros con base diaria en un balance hídrico para un cultivo cuyo ciclo de crecimiento sea de 120 días y deseando simular 100 ciclos vegetativos, el generador de números aleatorios deberá ser capaz de proveer al menos 12000 números aleatorios para cada variable que se genere sin repetirse.

- **Reproductividad:** Frecuentemente es deseable en estudios de simulación evaluar el comportamiento del sistema estudiado bajo las mismas circunstancias cuando solo una variable cambia; en tal sentido, es deseable que se repita exactamente la misma secuencia de números aleatorios durante cada simulación. También existen otras situaciones (más común) en la que se requieren diferentes secuencias de números aleatorios. Así entonces, el generador de números aleatorios deberá ser capaz de cumplir indistintamente con cualquiera de los objetivos señalados.

- **Eficiencia computacional:** Puesto que un estudio típico de simulación requiere una gran cantidad de números aleatorios, el generador de éstos deberá proveerlos usando un adecuado tiempo de computadora sin el requerimiento de excesiva cantidad de memoria.

Acorde con Gottfield (1984), es difícil encontrar estas cuatro características simultáneamente.

Generadores de números aleatorios

En décadas pasadas, para la generación de números aleatorios se utilizaban tablas que contenían gran cantidad de éstos; con el advenimiento de las primeras computadoras, éstas tablas eran almacenadas en la memoria y cada vez que se invocaba se obtenía uno de los números en forma aleatoria. Posteriormente, el primer método que realmente «genera» números aleatorios aparece en 1946, que consistió en elevar al cuadrado un número cualquiera y obtener los dígitos centrales del resultado. En la actualidad, la ineficiencia e inconveniencia de dichos métodos, resulta obvio en términos computacionales.

Métodos basados en números congruentes: En la actualidad la gran mayoría de generadores de números aleatorios utilizan el método de números congruentes lineales en donde una secuencia de enteros Z_1, Z_2, \dots es definida por la fórmula recursiva:

$$Z_i = (aZ_{i-1} + c) \bmod m \quad 5.20$$

donde « m » es un número positivo entero llamado módulo, « a » es el multiplicador y « c » el incremento; Z_0 sería el valor inicial. Acorde a Law y Kelton 1982, la ecuación 5.20 puede ser leída como: Para obtener un valor Z_i divida $(aZ_{i-1} + c)$ entre « m » y considere como valor Z_i al residuo de ésta división. Luego entonces:

$$0 \leq Z \leq m - 1 \quad 5.21$$

así, para obtener el número aleatorio U_i en el rango $[0, 1]$ se procede:

$$U_i = \frac{Z_i}{m} \quad 5.22$$

Además de la condición de no negatividad de las variables « m, a, c y Z_0 », deberán satisfacer la condición: $0 < m, a < m, c < m$, y $Z_0 < m$. Para resultados «convenientes» en el uso de éste método se recomienda dar un valor a « m » bastante grande tal como $m = 10^9$ o más para asegurar que los números aleatorios así generados estén realmente

en el rango $[0,1]$ aunque la periodicidad es inevitable. Otra manera de asegurar un «buen valor» de « m » es: $m = 2^b$ donde « b » es el número de dígitos binarios (bits) en una palabra de la computadora a ser usada. Valores recomendados para « a » son: 5^{15} ó $(2^{w/2} + 3)$ siendo « w » el número de bits y para « c », numerosa literatura recomienda cualquier número positivo entero.

Generadores multiplicativos: La crítica principal a los generadores basados en números congruentes, es que el valor de Z_i depende completamente del valor inicial de Z_0 y de las constantes « m », « a » y « c »; así, en cuanto Z_i tome un valor que ya ha tenido anteriormente, la secuencia empieza a repetirse.

Acorde a diversos autores el hecho de escoger un valor de $m = 2^b$ presenta un comportamiento estadístico muy pobre; así, Feddes (1998) propuso un método para obtener « m » al que llamó Generador Multiplicativo de Módulo Primo el cual consiste en adjudicar un valor a « m » que sea el número primo mas grande menor que 2^b .

Para este tipo de generador de números aleatorios « m » es de la forma $2^b - q$ donde « q » es un entero positivo. Para obtener $Z_i = (aZ_{i-1})(\text{mod } 2^b - q)$ partiendo de Z_{i-1} , se desarrolla:

$$Z_i = (aZ_{i-1})(\text{mod } 2^b) \quad 5.23$$

Si « k » es el entero más grande menor o igual a $aZ_{i-1} / 2^b$ luego entonces:

$$Z_i = Z' + kq \quad \text{si } Z' + kq < 2^b - q \quad 5.24$$

y

$$Z_i = Z' + kq - (2^b - q) \quad \text{si } Z' + kq \geq 2^b - q \quad 5.25$$

Números uniformemente distribuidos en un intervalo: En algunos estudios de simulación interesa solo explorar cierto rango de la función que describe el fenómeno en cuestión, en tal sentido, es deseable también el generar números aleatorios que

representen tal rango. Así, si «U», es un número aleatorio distribuido en el intervalo 0,1 es decir U[0,1] y «X» es una variable aleatoria continua distribuida en el rango «a,b» en el que «b» > «a», por proporcionalidad se tiene que: (Gottfried, 1984)

$$\frac{X - a}{b - a} = \frac{U - 0}{1 - 0} \quad 5.27$$

de donde

$$X = a + (b - a)U \quad 5.28$$

En el anexo III aparece un programa en FORTRAN 77 que utiliza éste procedimiento para generar números aleatorios uniformemente distribuidos sea en el intervalo U[0,1] u otro intervalo deseado; el ejecutable se denomina «RANDO2».

5.6 Generación de variables aleatorias

Se ha discutido la manera de obtener números aleatorios distribuidos uniformemente en el intervalo 0; 1 es decir, U[0,1]. La distribución de donde éstos números son obtenidos es la **uniforme** y constituye la base para la generación de variables aleatorias de diversas funciones probabilísticas como se verá en a continuación.

El uso de variables aleatorias generadas estocásticamente está ampliamente difundido en hidrología por medio de la generación de valores a partir de funciones de probabilidad conocidas para el estudio del comportamiento de diversos sistemas por ejemplo: Ghosh y Kulatilake, 1987, Sanchez *et al* 2003, Haan y Shulze, 1986. La generación de valores aleatorios, es especialmente útil en estudios de simulación en donde se crean escenarios hipotéticos para observar el comportamiento del sistema cuando las condiciones cambian; este proceso es conocido en la literatura como **análisis de riesgo** el cual es discutido en un capítulo posterior.

Método de transformación inversa

Acorde a Ang y Tang (1984), se pueden generar valores aleatorios de funciones de probabilidad, haciendo válido el hecho que la función de probabilidad acumulada para cualquier variable continua se distribuye uniformemente en el intervalo 0,1. Así para cualquier variable aleatoria «X» con una función probabilística de densidad « $f(x)$ », la variable generada:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad 5.29$$

se distribuye uniformemente en el intervalo (0,1)

En éste método, la función de distribución acumulada $F(x)$ es resuelta para « x », es decir, si $y = F(x)$, se tendrá que:

$$x = F^{-1}(y) \quad 5.30$$

Si « X » es una variable gobernada por alguna función probabilística de densidad y $Y = F(X)$ es el valor correspondiente en la función en la función de distribución acumulada, se puede entonces establecer que:

$$P\{Y \leq y\} = P\{X \leq x\} = F(x) \quad 5.31$$

si $F(x) = y$, entonces:

$$P\{Y \leq y\} = y \quad 5.32$$

Para generar un valor «X» utilizando el método de transformación inversa, se debe de contar con una función de distribución probabilística acumulada «F(x)» (por generalidad, al referirse a funciones, las letras mayúsculas denotan función acumulada y las minúsculas función de densidad) o bien con su función de densidad «f(x)» la cual debe ser integrable analíticamente. Si la función de densidad «f(x)» no es integrable (caso de la distribución normal y gama) se utiliza la simulación directa como se verá posteriormente en este capítulo.

Una vez que la función «F(x)» ha sido establecida, se deberá representar a «Y» por un número aleatorio uniformemente distribuido en el intervalo 0,1, es decir U[0,1]. Así entonces:

$$X = F^{-1}(U) \quad 5.33$$

La distribución exponencial: El comportamiento de diversas variables en hidrología siguen una distribución del tipo exponencial (i.e intervalo entre precipitaciones, cantidad de precipitación, etc). La función de densidad de ésta distribución se expresa como:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad 5.34$$

siendo λ el inverso de la media. Así, haciendo uso del método de transformación inversa para la generación de valores exponencialmente distribuidos se tendrá que:

$$x = -\left(\frac{1}{\lambda}\right) \ln[1 - F(x)] \quad 5.35$$

donde «X» es el valor exponencialmente distribuido y «U» es un número aleatorio uniformemente distribuido en el intervalo 0,1 por medio del algoritmo discutido anteriormente.

La distribución normal: Como se asentó con anterioridad, la función de distribución normal no puede ser integrada analíticamente por lo que el método de transforma-

ción inversa no puede ser empleado para la obtención de valores normalmente distribuidos.

Existe gran variedad de eventos que varían aleatoriamente siguiendo una distribución normal la cual tiene como principal característica el ser simétrica, es decir, las áreas ubicadas hacia ambos lados de la media tienen la misma forma. La función de densidad de esta distribución es:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad -\infty \leq z \leq \infty \quad 5.36$$

Si se considera un caso especial de la distribución normal en donde $\sigma = 1$ y $z = (x - \mu)/\sigma$ se obtiene

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad 5.37$$

lo que constituye la función probabilística de densidad para la **distribución normal estándar**. En el anexo III aparece un programa computacional para la integración de la ecuación 5.37 entre dos límites (valores de z preestablecidos), el programa lleva por nombre "normal".

Ejemplo: Los datos de evaporación diaria para el período junio-julio (20 años de registro diario) de la estación climatológica del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera ubicado en los 25° 78' de latitud norte y 103° 45' de longitud oeste, siguen una distribución normal con parámetros $\mu = 9.09$ °C y $\sigma = 2.40$ °C. ¿Cuál será la probabilidad de que la temperatura en un día del citado periodo sea $P(8.0^\circ\text{C} \leq X \leq 11.49^\circ\text{C})$? Utilizando la ecuación $z = (x - \mu)/\sigma$ arriba anotada, se observa que:

$$Z_1 = \frac{8.0 - 9.09}{2.40} = -0.45$$

y

$$Z_2 = \frac{11.49 - 9.09}{2.40} = 1.0$$

haciendo uso de la simetría de la distribución normal se tiene que:

$$P(-0.45 \leq Z \leq 1.0) = P(-0.45 \leq Z \leq 0) + P(0 \leq Z \leq 1.0)$$

De la tabla de «Z» se tiene que $Z_1 = 0.1736$ y $Z_2 = 0.3413$, por lo que $P(8.0^\circ\text{C} \leq X \leq 11.49^\circ\text{C}) = 0.5149$. Utilizando el programa «NORMAL» el resultado es 0.51499

Acorde al teorema del límite central, una muestra de medias obtenida de cualquier distribución, tenderá a distribuirse normalmente alrededor de la media teórica verdadera a medida que la magnitud de la muestra crece. Si las muestras son obtenidas de una población de «N» números aleatorios distribuidos uniformemente en el rango de 0,1, se puede escribir también:

$$Z = \frac{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N U_i - \left(\frac{1}{2}\right)}{\sqrt{\frac{1}{12N}}}$$

5.38

Si se multiplica el numerador y denominador de la ecuación 5.17 por «N» y posteriormente se considera a N = 12, la ecuación se reduce a:

$$Z = \sum_{i=1}^{12} U_i - 6 \quad 5.39$$

La ecuación 5.39 constituye la base para la obtención de valores **estándar** normalmente distribuidos partiendo de un número aleatorio de la distribución uniforme con U[0,1]. Esta ecuación establece que se tiene que generar 12 números uniformemente distribuidos y sumarlos, al resultado se le deberá restar un valor de 6 para obtener el valor deseado normalmente distribuido.

Acorde a diversos autores (i.e. Koffman y Friedman, 1987, Crawford – Brown, 2001, Gottfried, 1984, Haan 1982) si se desea generar un valor **normal** aleatorio con media μ y desviación estándar σ , se deberá primero generar un valor **normal estándar** mediante la ecuación 5.39 y sustituirlo en:

$$x = \mu + \sigma Z \quad 5.40$$

Un método alternativo para la generación de valores normales estándar es mediante el uso de cualquiera de las siguientes dos ecuaciones: (Sánchez 1994, Clarke, 1973)

$$Z = (-2 \ln U_1)^{\frac{1}{2}} \sin(2\pi U_2) \quad 5.41$$

y

$$Z = (-2 \ln U_1)^{\frac{1}{2}} \cos(2\pi U_2) \quad 5.42$$

El valor normal estándar así obtenido se deberá sustituir en la ecuación 5.40 para obtener el valor normalmente distribuido deseado.

La distribución log normal: Cuando las observaciones se ajustan a una distribución **log normal** y en consecuencia se desea generar datos para ésta distribución, se deberá obtener los parámetros de la función como: (Singh, 1992)

$$\mu = \ln \left[\frac{\mu_1^2}{\sigma_1^2 + \mu_1^2} \right] \quad 5.43$$

y

$$\sigma^2 = \ln \left[\frac{(\sigma_1^2 + \mu_1^2)}{\mu_1^2} \right] \quad 5.44$$

Una vez obtenidos los parámetros se utiliza:

$$X = e^{\mu + \sigma Z} \quad 5.45$$

en donde «Z» puede ser obtenida mediante las ecuaciones 5.39, 5.41 ó 5.42.

La distribución gama: Al igual que la distribución normal, la distribución gama no puede ser integrada analíticamente o resuelta explícitamente para «x», por lo que el método de transformación inversa para la generación de valores de ésta distribución, no puede ser utilizado.

La función de densidad gama de dos parámetros α y β (parámetros de forma y escala respectivamente) está dada por:

$$f(x) = \frac{\alpha^\beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x}}{(\beta - 1)!} \quad 5.46$$

La media de ésta función está dada por:

$$\mu = \frac{\beta}{\alpha} \quad 5.47$$

y la varianza por:

$$\sigma^2 = \frac{\mu}{\alpha} \quad 5.48$$

Diversos autores han demostrado que la variable «x» puede ser interpretada como la suma de variables exponencialmente distribuidas, de hecho cuando α y β son =1, la distribución gama se reduce a una distribución exponencial (ecuación 5.34). Luego entonces:

$$X = -\frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^{\beta} \ln U_i \quad 5.49$$

La ecuación 5.49 establece que para obtener un valor distribuido acorde a la función gama, se tendrá que generar β números aleatorios uniformemente distribuidos ($U[0,1]$) cuyos logaritmos deben ser sumados y afectados por $-1/\alpha$. Esta ecuación se restringe a valores de β enteros. Otro método para la generación de valores gama cuando β se distribuye en el intervalo 0,1 es como sigue:

Supóngase que U_1, U_2 y U_3 son variables aleatorias uniformemente distribuidas:

1) El primer paso es definir las siguientes dos igualdades:

$$S_1 = U_1^{\frac{1}{\beta}} \quad S_2 = U_2^{\frac{1}{2-\beta}} \quad 5.50$$

2) Verificar si $S_1 + S_2 \leq 1$, si esto se cumple, entonces:

$$M = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \quad 5.51$$

y

$$X = \frac{-M \ln(U_3)}{\alpha} \quad 5.52$$

3) Si $S_1 + S_2 > 1$, se tendrá que generar otros números aleatorios U_1 y U_2 y repetir el proceso.

Generación de datos multivariados

Normalmente en estudios hidrológicos se asume que existe independencia entre los parámetros que definen el comportamiento de algún fenómeno. Inclusive, técnicas avanzadas de análisis estocástico como el método Monte Carlo sobreestiman la posible correlación inherente a no pocos parámetros hidrológicos. El hecho de incluir en la generación aleatoria de valores de parámetros la correlación estadística existente tiene 2 objetivos principales: (Tiscareño *et al*, 1994 y Tiscareño *et al* 1993.)

- a) Evitar combinaciones de parámetros no reales que pudieran arrojar salidas absurdas de los modelos de simulación y
- b) Mantener la variabilidad natural del sistema durante la generación de los parámetros del modelo.

En este proceso, se requiere del conocimiento de la **media**, **desviación estándar** y la **correlación** entre variables (si se considera a solo 2 variables correlacionadas) ó la **matriz de covarianza** (si se considera a más de dos variables correlacionadas).

La distribución normal y la generación multivariada: Como se vio anteriormente, cualquier distribución puede ser reducida (estandarizada) a la distribución normal. Las ventajas en el uso de la distribución normal estriba en que es muy «manejable» en términos estadísticos por lo que es bastante usada como distribución «modelo» para muchos fenómenos hidrológicos. Además, varios fenómenos multivariados se aproximan a ésta distribución independientemente de la distribución original debido al teorema del límite central.

La función de densidad **normal multivariada** es una generalización de la función de densidad **normal univariada** y se obtiene modificando el exponente de la ecuación 5.36 (función normal univariada):

$$\frac{x - m}{\sigma^2} = (x - \mu)(\sigma^2)^{-1}(x - \mu) \quad 5.53$$

el cual mide la distancia al cuadrado de «x» a μ en términos de número de desviaciones estándar, por:

$$(x - \mu)' \Sigma^{-1} (x - \mu) \quad 5.54$$

donde μ representa el valor esperado del vector aleatorio «X», y Σ^{-1} es la matriz de covarianza (Banks, 1998). Así mismo la constante univariada normalizada :

$$\sqrt{2\pi \sigma^2} \quad 5.55$$

debe ser cambiada por una constante general que fuerza al área bajo la curva de densidad multivariada a ser la unidad para cualquier longitud de vector. Acorde a (Johnson y Wichren, 1992), esta constante es:

$$(2\pi)^{-\frac{p}{2}} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} \quad 5.56$$

Por lo tanto, la función de densidad normal p-dimensional para el vector aleatorio $X = [X_1, X_2, \dots, X_p]$ estará dada por:

$$f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{p}{2}} |\Sigma|^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{(x-\mu)' \Sigma^{-1} (x-\mu)}{2}} \quad 5.57$$

La función de densidad normal bivariada: La función de densidad normal bivariada ($p=2$), puede ser evaluada en función de los parámetros de las dos variables correlacionadas: $\mu_1 = E(X_1), \mu_2 = E(X_2), \sigma_{11} = \text{Var}(X_1), \sigma_{22} = \text{Var}(X_2)$ y $\rho_{12} = \rho_{12} / [(\sigma_{11})^{1/2} (\sigma_{22})^{1/2}]$, el cual es la correlación entre las dos variables, nótese que los subíndices indican la variable 1 y 2.

Para fines prácticos, es necesario sustituir los subíndices «1 y 2» por las variables «x» y «y» respectivamente, así entonces, sustituyendo el inverso de la matriz de covarianza Σ^{-1} e introduciendo el coeficiente de correlación, la ecuación 5.57 se expresará como:

$$f_{x,y}(x, y) = f_{y|x}(y|x) f_x(x) \quad 5.58$$

donde el primer factor al lado derecho de la igualdad es:

$$f_{y|x}(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y \sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{\frac{1}{2}(y-\mu_y - \rho_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x})(x-\mu_x)}{\sigma_y \sqrt{1-\rho^2_{xy}}}} \quad 5.59$$

y el segundo factor está dado por:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x} \right)^2} \quad 5.60$$

Los parámetros condicionales de la ecuación 5.58 son, para la media:

$$E(y | x) = \mu_y + \rho_{x,y} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \mu_x) \quad 5.61$$

y para la desviación estándar:

$$\sigma_{y|x} = \sigma_y \sqrt{1 - \rho^2} \quad 5.62$$

El proceso para el uso de la ecuación 5.58 consiste en generar un número normalizado «x» para la variable «X» acorde a la ecuación 5.40 (se supone que la variable de la cual se generará el número aleatorio tiene una media μ_x y una desviación estándar σ_x), posteriormente sustituirlo en las ecuaciones 5.59 y 5.60 el producto de éstas ecuaciones será la función probabilística de densidad condicionada «y» dado «x».

Método Montecarlo y el Teorema de Bayes

La aplicación del método Monte-Carlo en conjunción con la teoría Bayesiana, es útil cuando se requiere predecir valores en las entradas a los modelos. Es decir, se acepta de antemano que existe «incertidumbre» en los valores que un determinado parámetro o variable de entrada a los modelos pueda tomar. Así, el método propone la obtención de funciones de distribución anteriores como entrada al modelo para obtener funciones de distribución del(os) parámetro(os) de las salidas del modelo pudiendo actualizar, con la información así generada, los parámetros de las funciones de entrada al modelo.

La Figura 5.4 señala de manera gráfica el algoritmo del método el cual puede ser resumido en los siguientes pasos (modificado de Tiscareño, *et al* 1993):

- 1) Obtener las funciones de densidad probabilísticas de las bases de datos pertinentes para las diferentes variables que involucraría el modelo de simulación en cuestión

- 2) Derivar la(s) función(es) de distribución condicionada pertinentes.
- 3) Generar las entradas al modelo acorde a los parámetros de las funciones descritas en los pasos 1 y 2
- 4) Obtener la(s) función(es) de distribución de las salidas del modelo
- 5) Cuando pertinente, comparar las funciones de distribución de salidas con las de entradas y modificar los parámetros de éstas últimas para obtener mejores estimaciones en las salidas. En este punto, es necesario el establecer un criterio de selección de aquellas salidas que se considera mejorarán los parámetros de las funciones de entrada en términos de una mejor predicción
- 6) Repetir los pasos hasta que las funciones de densidad de entrada adquieran estabilidad.

El algoritmo mostrado en la Figura 5.4 ha sido utilizado por García, *et al* (1996) para la obtención de Guías de Riego basadas en un modelo de simulación hidrológico. En este, se consideró la variación aleatoria de los parámetros de las función de infiltración de los suelos (sorbilidad y conductividad hidráulica a saturación), considerando la probabilidad conjunta de que un determinado valor ocurra en virtud de que estos valores están correlacionados. Con esta información y algunos datos fijos en el modelo (parámetros de diseño del riego superficial) se hizo uso del modelo de simulación considerando como opciones viables a aquellas combinaciones de parámetros que resultaran en una eficiencia de aplicación del agua de riego mayor o igual a 85% y un coeficiente de uniformidad mayor o igual a 85%.

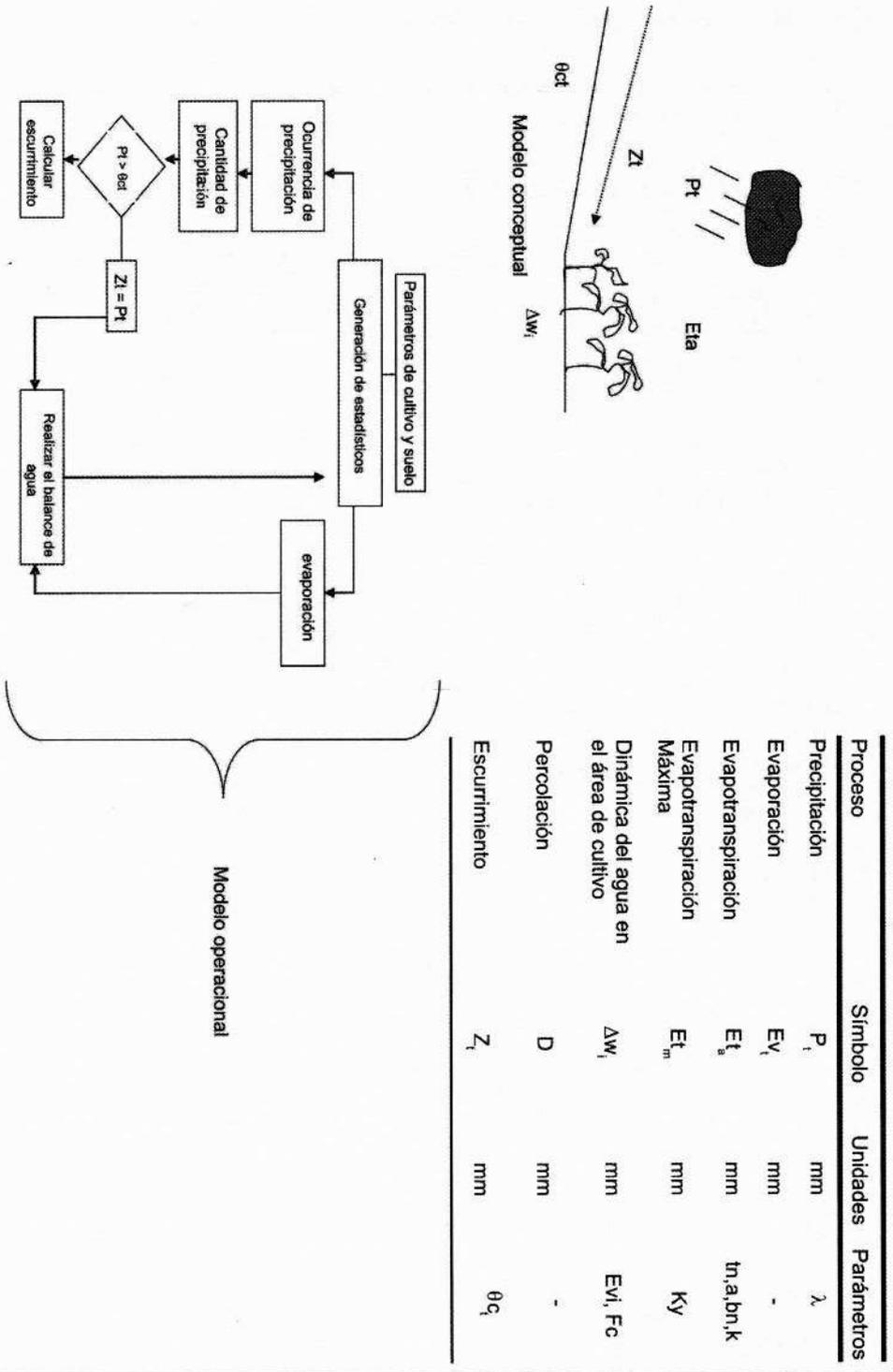


Figura 5.3 Ejemplo del desarrollo de un modelo de captación del agua de lluvia

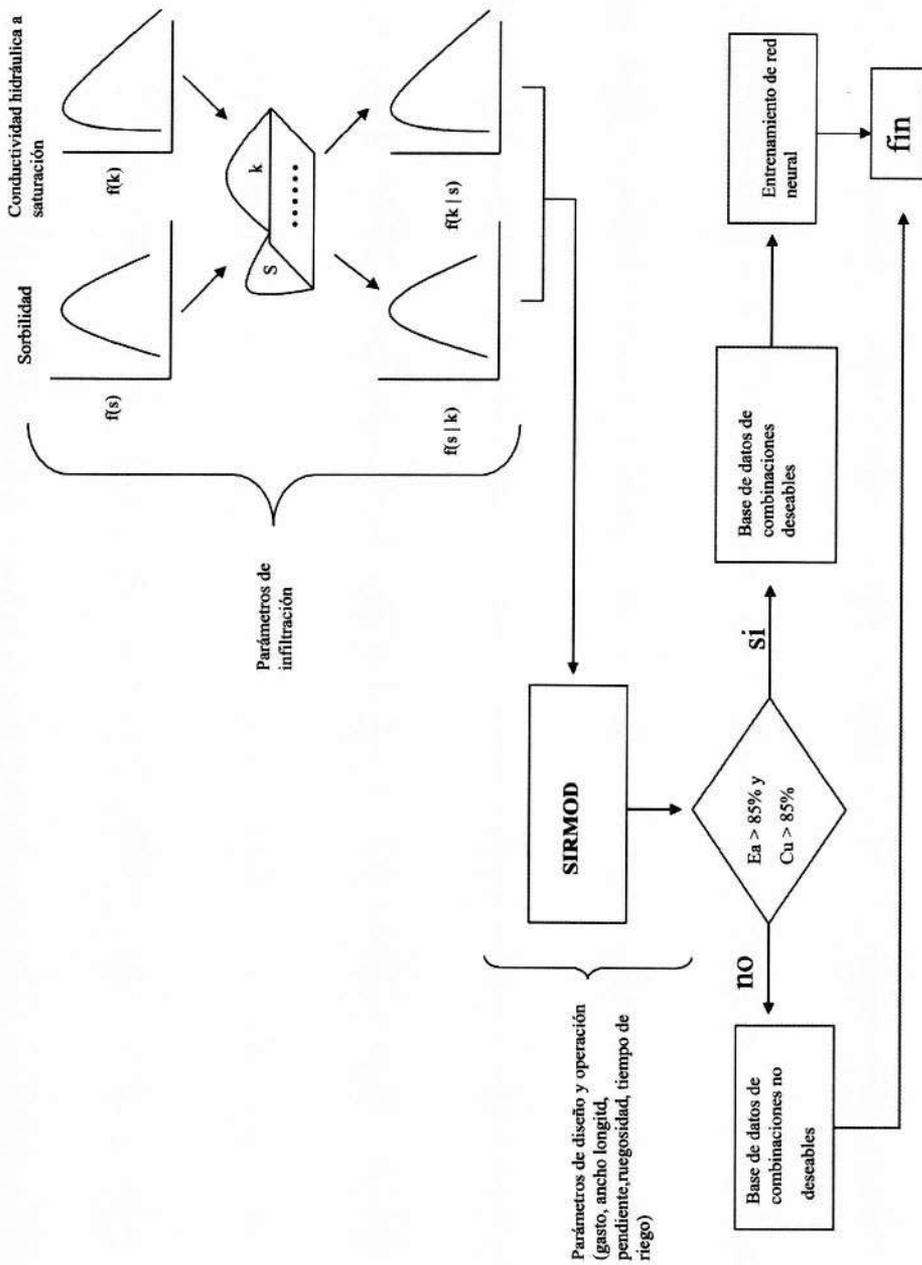


Figura 5.4: El concepto del método Monte Carlo.

Capítulo VI

Incertidumbre climática y análisis de riesgo

La principal ventaja en el uso de simulación es su flexibilidad. Así, acorde a Gottfried, (1984), prácticamente cualquier problema que involucre riesgo puede ser representado con un razonable grado de precisión por medio de un modelo de simulación. Una de las ventajas del uso de la simulación de procesos es el hecho de que de un estudio, utilizando ésta técnica, se puede obtener información estadística a cerca del comportamiento del sistema lo que permite la cuantificación del comportamiento y también la identificación de la probabilidad de que el comportamiento del sistema sea significativamente diferente. En otras palabras, la simulación provee un indicativo del riesgo asociado con una política de operación particular así como una medida del comportamiento del sistema esperado.

6.1 Terminología común

La degradación de los recursos naturales en varias partes del mundo y específicamente en los países en vías de desarrollo, ha adquirido proporciones seriamente alarmantes. Por ejemplo, la deforestación impacta la diversidad biológica alterando el clima global; la erosión de los suelos reduce la capacidad de satisfacer las crecientes demandas de alimentos, además, la deposición de sedimentos en obras de almacenamiento reduce la capacidad de extracción del vital líquido para diversos propó-

sitos. Estos y otros problemas añadidos ejemplifican la **vulnerabilidad** inherente a nuestros recursos naturales.

Bortom y Shoham (1991) establecen que el término vulnerabilidad está constituido por dos componentes principales:

- a) **Riesgo** a la exposición de diferentes tipos de desastres ó estrés, lo que conlleva a la noción de probabilidad de ocurrencia de eventos los cuales pueden variar espacial y temporalmente.

- b) La habilidad de sobrellevar los desastres ó estrés.

Una acepción más concreta del término vulnerabilidad sería: Sensibilidad a la Variabilidad Climática.

De lo anterior se deduce que un sistema **vulnerable** es un sistema bajo riesgo el cual puede ser **físico** ó **económico** sin ser ambos necesariamente excluyentes. El riesgo físico se relaciona a variables como el rendimiento de los cultivos siendo la principal fuente de riesgo físico el riesgo climático. Sin embargo, el comportamiento físico de un cultivo es solo una apreciación parcial del riesgo al que esta sujeto un productor dado que, comúnmente, los productores de zonas áridas organizan su sistema productivo de tal manera que diversifican sus actividades tratando de reducir el riesgo. Así, si fracasan en una actividad (producción de maíz por ejemplo), en otra (crianza y venta de especies menores) les puede ir mejor de tal manera que las ganancias de la segunda sobrellevan a las pérdidas de la primera.

El riesgo económico se relaciona a la variabilidad del ingreso de la que, la incertidumbre en el rendimiento de los cultivos es solo una fuente en virtud de que la variación en los precios de los productos y factores institucionales y legales contribuyen también de manera importante.

En este contexto, acorde a Chowdhury (1992), el análisis de riesgo puede no necesariamente basarse en análisis probabilísticos considerando el amplio rango de consideraciones en que puede ser usado. Así, Fischhoff *et al* (1984) definen al **análisis de riesgo** como una herramienta para la toma de decisiones que usa conocimiento base el cual consiste de información científica y política. Luego entonces, el análisis de riesgo es un subconjunto de **teoría de decisiones** (Sánchez, et. al. 1994).

La definición secular de riesgo se relaciona con la **probabilidad de falla ó pérdida** esperada pudiéndose entonces establecer la relación: **RIESGO = INCERTIDUMBRE + DAÑO**, (Chowdhury, 1992).

6.2 Cuantificación del riesgo

Acorde a Cohessen y Covello (1989), la estimación del riesgo es equivalente a la estimación de la probabilidad estadística de ocurrencia de un daño como resultado de la exposición a un agente de riesgo. En hidrología y específicamente en la agricultura, ese agente de riesgo es principalmente el clima. La severidad del daño depende del tipo de agricultor (en este caso) en términos económicos. Así entonces, para agricultores económicamente vulnerables, el impacto de eventos extremos puede tener una importancia tal que quede subestimado por la aparente probabilidad de ocurrencia (Jhones y Thorton, 1993).

Los sistemas agrícolas se caracterizan por la complejidad e interdependencia de sus componentes y por la variabilidad y riesgo implícito en su manejo. En la agricultura de riego por ejemplo, el riesgo se restringe a enfermedades, plagas y principalmente a cambios en precios y condiciones de mercadeo. Por otro lado, en agricultura de temporal o de subsistencia, además de los factores de riesgo arriba descritos, se tiene que añadir las condiciones climáticas que son mucho menos predecibles. Asimismo, en agricultura de riego, el riesgo es estimado como porcentaje de pérdida basado en estadísticas (Abbaspour, 1992).

Una aproximación que comúnmente se utiliza para análisis de riesgo, consiste en la optimización de una función de rendimiento basado en restricciones al sistema (Berbel, 1993). Un buen ejemplo de éste método lo constituye el modelo MUDAS (modelo de un sistema agrícola de secano bajo incertidumbre, por sus siglas en inglés). La técnica particular en la que se basa el modelo MUDAS consiste en programación estocástica discreta en la que se consideran variaciones estacionales tomando en cuenta un número discreto de estados de la naturaleza. Las características esenciales del modelo son:

- a) Contiene una función objetivo la cual, para un agricultor **neutral al riesgo**, consiste en maximizar beneficios. Para un agricultor **adverso al riesgo** la función objetivo es la maximización de la utilidad asociada con el uso de las actividades agrícolas y los recursos.

b) La maximización del beneficio, ó utilidad, se consigue con la selección de un conjunto óptimo de actividades agrícolas considerando la limitación de recursos, características físicas del lugar, estado financiero, maquinaria y la labor, (Kinwell, et. al. 1992).

Otro método usado para el análisis de riesgo lo constituyen los árboles de decisión (Ang y Tang, 1984). En éstos árboles de decisión las alternativas de manejo se enlistan en una matriz de decisión con sus posibles salidas. Estas matrices integran los componentes relevantes del análisis de decisión en una manera sistemática disponible para una evaluación analítica de la alternativa óptima. Después de construir la matriz, se obtiene una función de utilidad.

El uso de índices es también usado para la cuantificación de riesgo como: (Fischhoff, 1984)

$$R = \sum_{j=1}^n W_j Y_j \quad 6.1$$

donde Y_j es la utilidad esperada para el atributo «j» y W_j es un factor de ponderación expresando la importancia relativa.

6.2.1 Aproximación determinística versus Aproximación estocástica

Usualmente en hidrología, manejo de cuencas y en ramas de la ciencia afines, el éxito de una determinada obra, se mide en términos del comportamiento del sistema diseñado. Por ejemplo, en sistemas de captación de agua de lluvia el éxito se evalúa como función del almacenamiento de humedad en el suelo u otro tipo de almacenamiento. En éste criterio, la oscilación de las variables de entrada al sistema (proceso aleatorio) no son consideradas, es decir, si ninguna variable involucrada en el sistema sigue una distribución probabilística, se dice entonces que el modelo que describe a ése sistema es determinístico.

Si aceptamos que nuestro conocimiento relativo al comportamiento de diversos sistemas no es perfecto, y considerando la incertidumbre asociada con algunos de sus

parámetros, se puede concluir que existen enormes limitaciones en las aproximaciones determinísticas en el análisis de riesgo. Estas aproximaciones, no permiten el análisis de credibilidad y riesgo bajo condiciones de incertidumbre.

La simulación estocástica (citada también como método Monte Carlo) utiliza modelos matemáticos para el estudio de sistemas que se caracterizan por la ocurrencia de eventos discretos aleatorios los cuales son representados por variables aleatorias. La aleatoriedad encontrada en un sistema real puede ser sintetizada. Este tipo de aproximación permite la cuantificación del comportamiento esperado del sistema y la cantidad de la variación aleatoria lo que constituye un indicativo del grado de riesgo asociado con el sistema (Gottfried, 1984).

Sin embargo, acorde a Linsley (1976), los métodos estocásticos presentan la desventaja que las variables generadas estocásticamente son tan creíbles como los parámetros de las funciones de distribución de donde fueron generadas lo sean. Esto pone de manifiesto que la magnitud del record histórico ó base de datos tiene un efecto en la incertidumbre de los parámetros a ser estudiados.

El gran problema en el análisis de riesgo estriba en la predicción y control de variables aleatorias como el caso de eventos extremos de precipitación y temperaturas. Esto enfatiza el estrecho vínculo entre el riesgo y la productividad.

6.3 Delimitación de áreas de impacto

Para estimar los efectos del clima en la agricultura, es necesario obtener una representación cuantitativa de la variación del clima. Esto se debe definir en forma paramétrica en donde el orden de los parámetros son usados como entrada a modelos de simulación de crecimiento de los cultivos. Puesto que la variación climática no puede ser predicha con exactitud, la aproximación consiste en presentar escenarios hipotéticos en los que se desarrolla la actividad agrícola. En la Figura 6.1 se aprecia un diagrama de flujo «genérico» mostrando los pasos en la determinación de áreas de impacto. Se utiliza el término «genérico» para puntualizar variaciones en procedimiento bajo el mismo esquema que el método puede sufrir como se verá posteriormente en este capítulo.

Un paso esencial en el mapeo de áreas de impacto (ó zonas vulnerables) consiste en la parametrización de las funciones probabilísticas de eventos climáticos sobre un

área considerada. La información es manejada a nivel espacial por procesos de interpolación cuando la información es escasa pero que presenta cierta tendencia. El método más apropiado en el estudio de información climática lo constituye la teoría Bayesiana en donde probabilidades condicionales son analizadas.

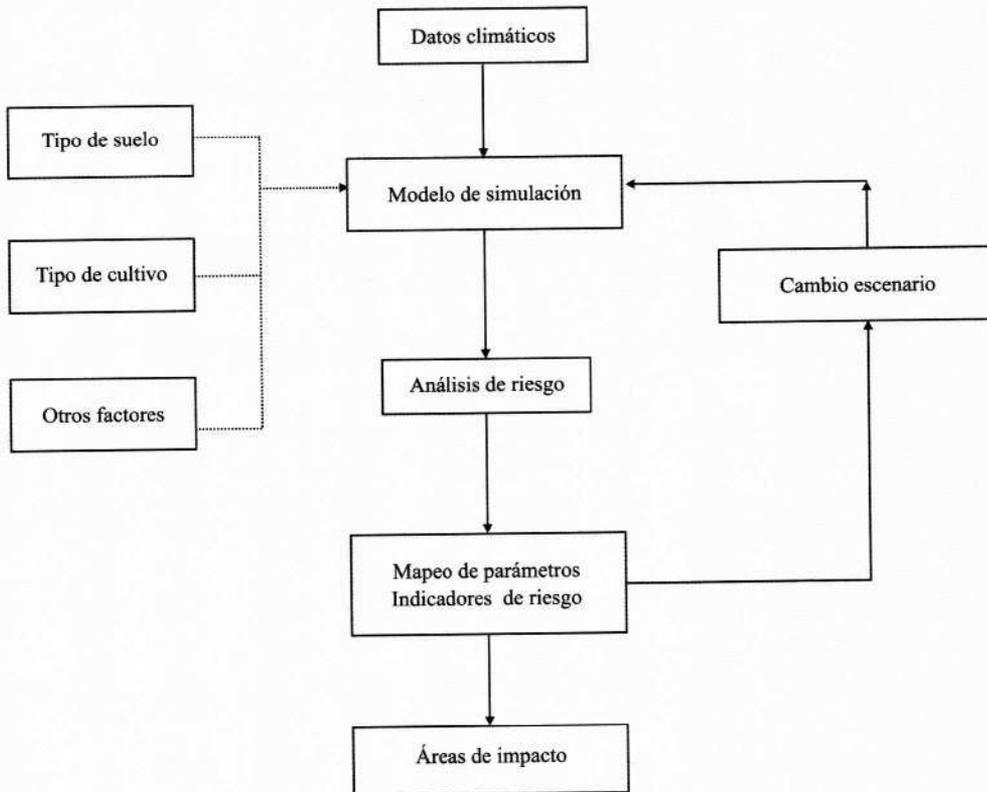


Figura 6.1 : Delimitación de áreas de impacto climático

6.3.1 Método de aproximación

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 infor-

mación de este tipo, son 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 1988, Haan, 1982); esto es esquematizado en la figura 6.2

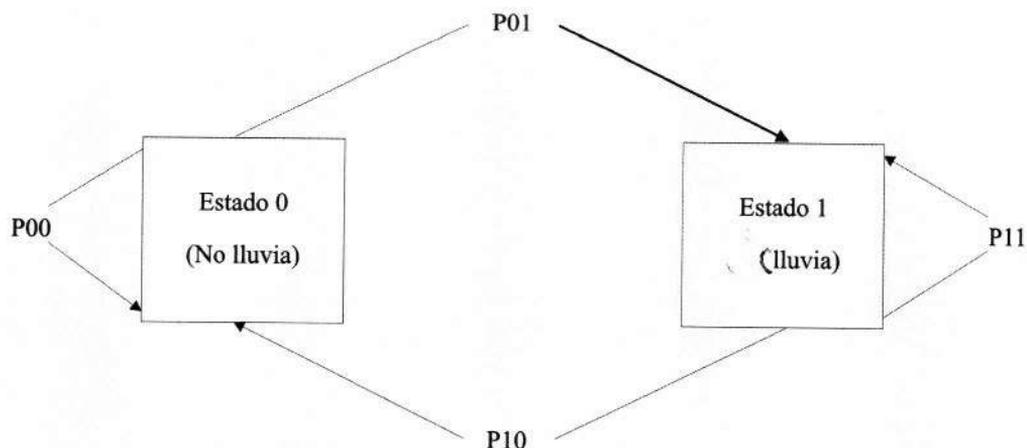


Figura 6.2: Representación esquemática de una Cadena de Markov de primer orden para dos estados

Acorde a la anterior figura, para cada valor en la serie de tiempo de la lluvia, el proceso estocástico se encuentra en el estado 0 (no lluvia, $X_t = 0$) ó 1 (lluvia $X_t = 1$). En cada paso, el estado puede permanecer inmóvil o bien cambiar a otro estado; es decir, si hoy llueve puede suceder que mañana también llueva o que no ocurra lluvia. De esta manera, son posibles 4 transiciones:

- Día sin lluvia seguido de día sin lluvia (p_{00})
- Día con lluvia seguido de día sin lluvia (p_{10})
- Día sin lluvia seguido de día con lluvia (p_{01})
- Día con lluvia seguido de día con lluvia (p_{11})

Las probabilidades de transición son condicionales para el estado futuro $t + 1$, es decir, si ocurrirá precipitación mañana, dado el estado al tiempo t , es decir, si ocurrió precipitación hoy. En forma matemática esto es (Sánchez, *et al* 1995):

$$p_{00} = \Pr\{X_{t+1} = 0 \mid X_t = 0\} \quad 6.2a$$

$$p_{01} = \Pr\{X_{t+1} = 1 \mid X_t = 0\} \quad 6.2b$$

$$p_{10} = \Pr\{X_{t+1} = 0 \mid X_t = 1\} \quad 6.2c$$

$$p_{11} = \Pr\{X_{t+1} = 1 \mid X_t = 1\} \quad 6.2d$$

El parámetro climático p_{00} , es el que debiera incluirse en el mapeo de la variabilidad climática en virtud de que éste parámetro está estrechamente relacionado con la duración media del periodo seco el cual a su vez se asocia con la variación de la precipitación en el corto y largo plazo. Asimismo, la p_{00} , ofrece una determinación estadística robusta.

En la figura 6.3 se puede apreciar la variación de los parámetros p_{00} , p_{11} , p_{10} y p_{01} para la estación climatológica del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID-RASPA) perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). El CENID-RASPA se encuentra ubicado en los 25°34' latitud norte y 103°27' longitud oeste. El procedimiento para obtener las probabilidades condicionales consiste en calcular las frecuencias relativas de la base de datos como sigue:

$$p_{01} = \frac{\#1's \text{ seguidos de } 0's}{\text{total de } 0's} \quad 6.3$$

$$p_{11} = \frac{\#1's \text{ seguidos de } 1's}{\text{total de } 1's} \quad 6.4$$

En el anexo III se presenta el código fuente de un programa computacional en lenguaje Fortran 77 para la estimación de éstos parámetros. Dada la gran variación

temporal de la precipitación pluvial, es recomendable la obtención de las probabilidades condicionales antes anotadas en forma mensual o al menos en forma estacional. De la figura 6.3 se observa que $p_{00} + p_{10} = 1$ y que $p_{01} + p_{11} = 1$. También de ésta figura se puede concluir el alto riesgo que representa la agricultura de temporal para el área de influencia de esta estación dado que la p_{10} es bastante crítica para todo la estación lluviosa.

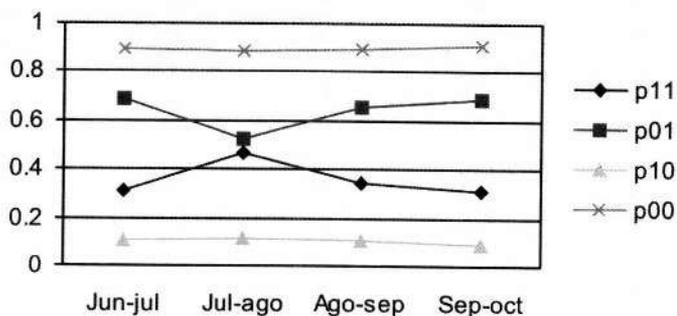


Figura 6.3: Variación de las probabilidades condicionales de precipitación

6.3.2 Áreas potenciales de escurrimiento

La meta de cualquier tomador de decisión a cualquier nivel en el ámbito productivo, es la minimización del riesgo dadas las inversiones que para producir se requieren. Como se asentó con anterioridad, si se considera a la precipitación pluvial como un proceso aleatorio se deberá aceptar que la técnica de simulación ofrece la mejor opción para sustentar la toma de decisiones en el proceso de planeación. En zonas de temporal deficiente, es necesario el solventar el déficit hídrico de los cultivos mediante técnicas de captación de agua de lluvia que garanticen cantidades adicionales de agua. Así, con criterio de toma de decisiones, es necesario el conocer, dada un área, dónde es «viable» la inversión tratando de minimizar el riesgo lo que conlleva a buscar delimitación de áreas potenciales.

El algoritmo para el análisis, debe contemplar la variación espacial de la precipitación pluvial y características de los suelos dado el impacto que la interacción de estos dos factores tiene en la producción de escurrimientos y por ende en los rendimientos de los cultivos.

A continuación se expone un algoritmo para la cuantificación de riesgo en términos de capacidad para producir escurrimiento. Se toma como ejemplo un área del Norte de México conocida como Comarca Lagunera. La región comprende 2,203,120 has en el estado de Coahuila y 2, 585, 630 en el estado de Durango y se ubica entre los 24° 25' y 26° 29' latitud norte y entre los 102° 30' y 104° 48' de longitud oeste. El estudio incluye registros de 21 estaciones climatológicas. De éstas estaciones, 15 se ubican dentro del área de estudio y 6 fuera. Estas últimas estaciones fueron incluidas para que el proceso de interpolación fuera más veraz en los límites del área considerada.

La precipitación pluvial en la región, sigue una distribución exponencial cuya función acumulada es:

$$F_x(X) = 1 - e^{-\lambda x} \quad 6.5$$

donde, como se asentó en el capítulo V, λ es el inverso de la media de la precipitación diaria, «e» es la base de los logaritmos naturales y F_x denota la función de distribución acumulada de «X». La probabilidad condicional p_{10} se obtiene para las 21 estaciones consideradas. Para la simulación de escurrimiento (Ru) se utiliza la transformación de una distribución exponencial como:

$$Ru = \frac{1}{-\theta} \text{Ln} \left[1 - \left[\frac{U - a}{1 - a} \right] \right] \quad 6.6$$

donde es el inverso del escurrimiento medio diario, «U» es un número aleatorio y «a» es la probabilidad de que no ocurra escurrimiento.

Para la obtención del parámetro «a» bajo condiciones limitadas de disponibilidad de información, se puede utilizar funciones frontera que cuantifiquen la cantidad necesaria de humedad en el suelo (Th) para iniciar escurrimiento dado cierto contenido antecedente de humedad. Por ejemplo Sánchez (1994) obtuvo tres funciones frontera para el mismo número de suelos las cuales cuantifican lo arriba asentado. Aunque las funciones frontera fueron obtenidas en condiciones controladas con un simulador de lluvia, éstas pueden ser utilizadas en estudios preliminares en cualquier tipo de suelo. Las funciones son:

para suelos ligeros

$$Th = 4.138 e^{(-0.038)*\beta_{t-1}} \quad R^2 = 0.68 \quad 6.7$$

para suelos medios

$$Th = 3.961 e^{(-0.041)*\beta_{t-1}} \quad R^2 = 0.69 \quad 6.8$$

y para suelos pesados

$$Th = 2.720 e^{(-0.031)*\beta_{t-1}} \quad R^2 = 0.79 \quad 6.9$$

donde β es el contenido final de humedad en el día anterior ($t-1$) en milímetros.

Acorde a éstas funciones, el contenido mínimo inicial de humedad en el suelo para iniciar el escurrimiento es de 4.1 mm, 3.5 mm y 2 mm para suelos ligeros medios y pesados respectivamente. En virtud de que se desea potencialidad de escurrimiento bajo condiciones secas, se debe considerar el contenido inicial de humedad para los diferentes suelos igual a 0.

La obtención del parámetro θ consiste en generar estocásticamente precipitación pluvial acorde a la ecuación 6.5 mediante el algoritmo discutido en el capítulo V considerando que se producirá escurrimiento en aquellos días en los que la diferencia entre la precipitación generada y el respectivo « Th » sea positiva.

Utilizando un sistema de información geográfica se realiza el proceso de interpolación obteniéndose mapas del parámetro λ y de la probabilidad condicional p_{10} . Posteriormente se realiza una tabulación cruzada en la que las categorías de una imagen son comparadas con aquellas de una segunda imagen generando una tabla con el número de celdas en cada combinación. Esta operación es necesaria en virtud de que una área pudiera localizarse bajo la influencia de un buen regimen pluvial (representado en este caso por el parámetro λ) pero en un suelo de textura arenosa lo que impediría la aparente posibilidad de escurrimiento mostrada por el regimen pluvial.

Se debe contar además con un mapa de texturas. Para el ejemplo que aquí se expone, dicho mapa se obtuvo partiendo del contenido de partículas primarias de suelo utilizando el criterio propuesto por Shults (1973). El procedimiento de interpolación comúnmente usado es el inverso del cuadrado de la distancia. En este método, los puntos son ponderados de tal manera que la influencia de un punto relativo a otro, decrece con la distancia. La ponderación es asignada mediante el uso de una potencia que controla como la influencia declina conforme la distancia se incrementa, para el presente ejemplo el factor de ponderación es 2.

La ecuación utilizada para el método de interpolación expuesto es:

$$Z = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{Z_k}{h_{km}^2}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{h_{km}^2}} \quad 6.10$$

donde Z es el valor interpolado, Z_k es el punto vecino y h_{km} es la distancia entre los puntos.

Posteriormente es menester realizar tabulaciones cruzadas consecutivas del mapa obtenido de los parámetros λ y p_{10} y las texturas consideradas: migajón arcilloso, arcillo-limoso, migajón arcillo-limoso y migajón arcillo-arenoso. La Figura 6.5 esquematiza el procedimiento antes señalado.

El proceso de simulación consiste en los siguientes pasos:

1. Parametrizar el modelo de precipitación para todas las estaciones climáticas
2. Obtener la probabilidad condicional p_{10} para cada estación
3. Generar precipitación partiendo de la distribución exponencial y obtener los días en los que se produce escurrimiento y la cantidad de escurrimiento acorde a la textura del suelo
4. Parametrizar el modelo de escurrimiento (parámetros «a» y θ)

5. Generar cantidades de escurrimiento con el modelo de escurrimiento. El procedimiento en éste punto consiste en generar un número aleatorio uniforme con la característica de «a» < U < 1, lo que obliga al número aleatorio a ser mayor que la probabilidad de no escurrimiento («a»); posteriormente se genera otro número aleatorio y se calcula la cantidad de escurrimiento acorde a la ecuación 6.6

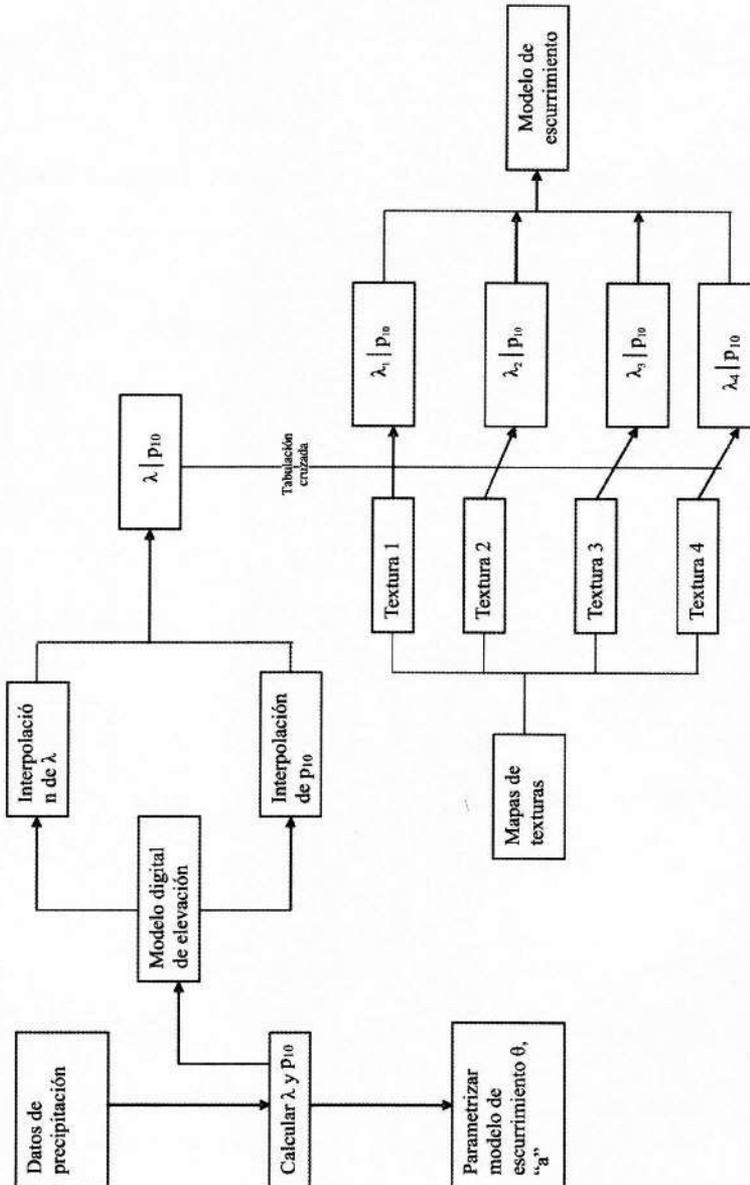


Figura 6.5: Diagrama de flujo para la obtención de áreas potenciales de escurrimiento con sistemas de información geográfica.

El Cuadro 6.1 muestra el resultado de la tabulación cruzada de los mapas de λ y el parámetro p_{10} ; también en la tabla se muestran los parámetros del modelo de escurrimiento. Para parametrizar el modelo y para obtener los escurrimientos, se realizan «n» número de simulaciones acorde a:

$$n = \frac{(t^2 * S_x)^2}{E} \tag{6.11}$$

Cuadro 6.1: Parámetros del modelo de escurrimiento para diferentes texturas

	Textura									
	λ	p_{10}	Arcillo limoso		Migajon arcillo limosa		Migajon arcillosa		Migajon arcillo arenosa	
			a	θ	a	θ	a	θ	a	θ
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.139	0.044	0.85	0.023	-	-	-	-	-	-
3	0.161	0.044	0.85	0.034	0.785	0.058	-	-	-	-
4	0.139	0.063	0.86	0.039	0.870	0.040	0.857	0.033	-	-
5	0.161	0.063	0.86	0.030	0.885	0.041	-	-	-	-
6	0.139	0.077	0.74	0.053	0.771	0.059	-	-	-	-
7	0.161	0.077	0.77	0.057	0.820	0.044	0.804	0.047	0.829	0.052
8	0.212	0.077	0.77	0.068	0.837	0.064	-	-	-	-
9	0.139	0.107	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.161	0.107	0.804	0.042	-	-	-	-	-	-
11	0.212	0.107	0.808	0.072	-	-	-	-	-	-

donde «t» es obtenida de la tabla de Student para un valor crítico ($t = 1.96$ para un 95% de intervalo de confianza), S_x es una desviación estándar preliminar y «E» es el error deseado en la variable a calcular.

En el anexo III aparece el código fuente del programa computacional para el cálculo de los parámetros del modelo; el ejecutable es «ASCE».

6.4 Categorización del Riesgo

Como se detalla en el capítulo VIII, en condiciones de temporal deficiente, numerosa literatura recomienda el uso de obras de captación de agua de lluvia o cosecha de agua de lluvia. Puesto que bajo estas condiciones de incertidumbre climática, el agricultor no está dispuesto a poner en riesgo su ya de por sí endeble situación económica, para una recomendación fundamentada, es necesario un análisis ex-ante del comportamiento de la obra de captación considerando diversas posibilidades climáticas. A esto se conoce como **análisis de riesgo** el cual debe ser parte primordial en todo proyecto de captación de agua de lluvia, (Sánchez, et. al. 1995). Así, el proceso de toma de decisiones se conforma explícitamente al considerar posibilidades de éxito en términos de ingreso neto.

Como se ha mencionado anteriormente, en el ámbito de la producción agropecuaria, el riesgo puede ser definido como la variación del ingreso (riesgo financiero) el cual es resultado de la incertidumbre. En este contexto, el riesgo se circunscribe a la ocurrencia de eventos hacia arriba o abajo de una función que describe el ingreso esperado.

Haciendo uso del algoritmo descrito en éste documento y utilizando un modelo de simulación (GROWIN) desarrollado por Sánchez (1994), se realizó un análisis de factibilidad de obras de captación de agua de lluvia para la región Lagunera de Coahuila y Durango, utilizando datos de una estación climática ubicada en el Centro Nacional de Investigaciones Disciplinarias en Relaciones Agua - Suelo - Planta - Atmósfera perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Así, se usó el modelo simulando el crecimiento y rendimiento del cultivo maíz para diferentes relaciones área de siembra - área de escurrimiento (RES) bajo diferentes tipos de suelo. La Figura 6.5 muestra los resultados después de 100 simulaciones para cada relación estudiada. En la misma figura, la línea recta indica el costo de producción acorde a la RES estudiada siendo entonces solo factibles los casos por arriba de la línea de costos ya que representan ganancias.

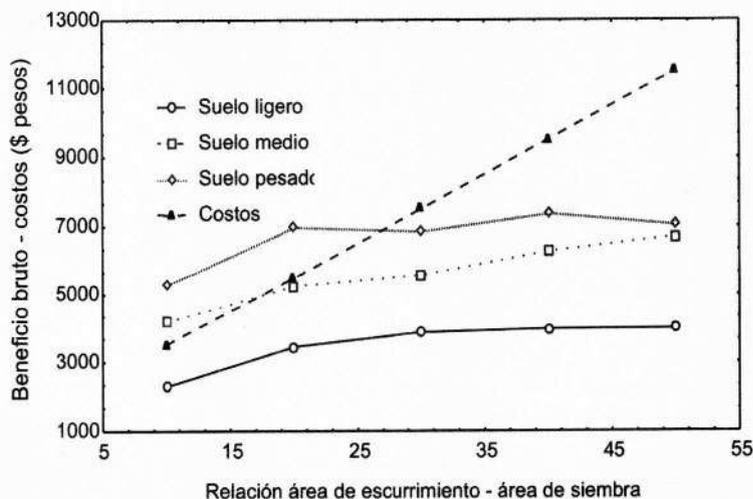


Figura 6.5: Resultados de cien simulaciones con el modelo GROWIN

Bajo el criterio arriba descrito, solo tres RES son factibles (aunque se pudiera elegir una RES intermedia a las RES estudiadas) ya que presentan ganancias en diferente grado. Así las RES 10:1 en suelos medios, 10:1 y 20:1 para suelos pesados son las únicas combinaciones factibles.

El aspecto restante para fundamentar la decisión, estriba en conocer las probabilidades de ocurrencia de los puntos por arriba de la línea de costos que señala la Figura 6.5. Así, la Figura 6.6 muestra las funciones probabilísticas de densidad de las tres RES resultantes.

Por la característica de simetría de la función de densidad normal, se conoce de antemano que el 68% de las observaciones se localizan en \pm una desviación estándar de la media, así para la RES 10:1 del suelo ligero se puede esperar con un 68% de probabilidad que el rendimiento oscile de 1.38 a 4.18 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, para la RES 10:1 del suelo pesado el rendimiento oscilara de 2.02 a 5.02 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ y para la RES 20:1 del suelo pesado el rendimiento oscilara de 3.55 a 5.77 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Se puede obtener también inferencia relativa a la probabilidad de obtener un rendimiento predeterminado en cualquiera de las tres funciones.

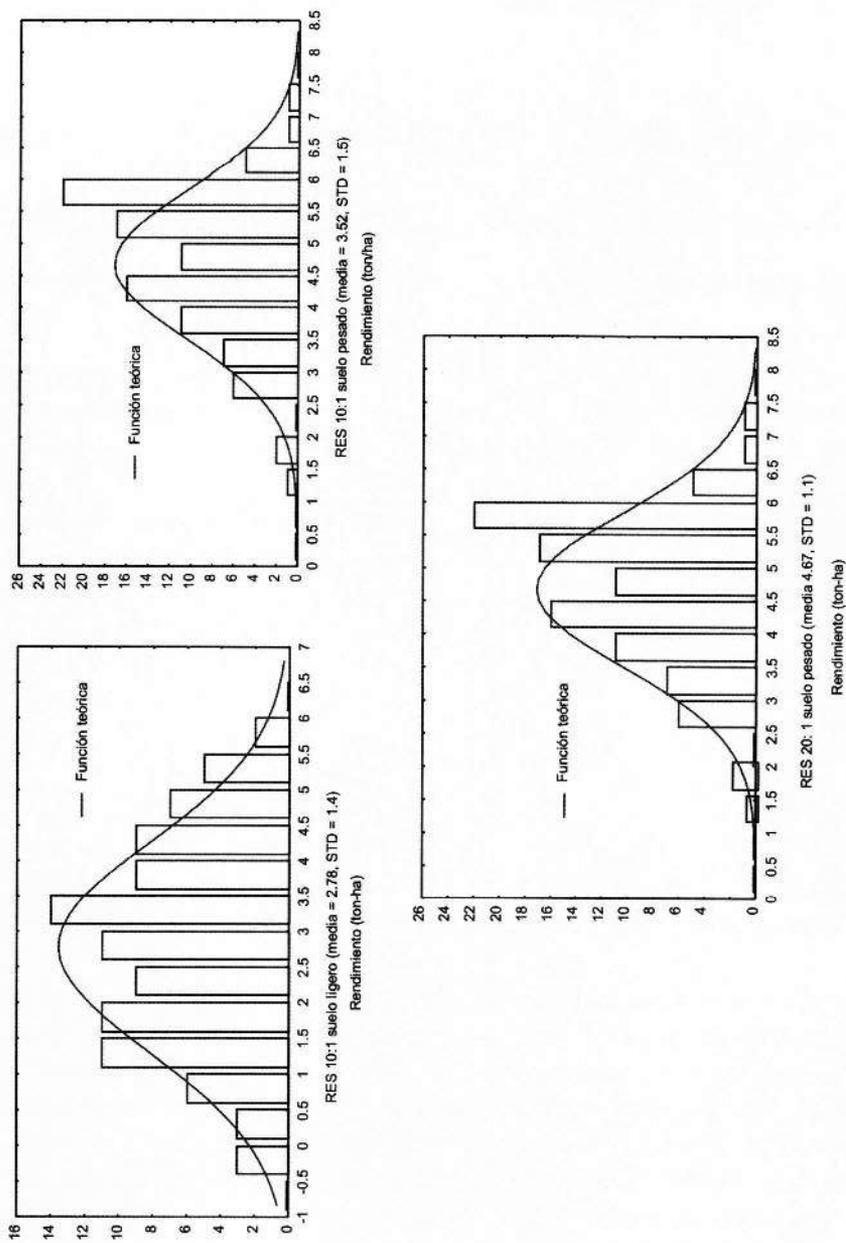


Figura 6.6: Funciones probabilísticas de densidad (FPD) para las tres RES factibles

Si se considera como variable de decisión a la cantidad total de agua que se recibe en el módulo de cultivo, se puede categorizar el comportamiento del agricultor al riesgo lo que matemáticamente es definido como:

$$E(R_e | P) = \max[P \beta_1 + (1 - P) \beta_2] \quad 6.12$$

donde $E(R_e | P)$ es el ingreso neto esperado (R_e) dada cierta probabilidad (P) de tener una cantidad total de agua (precipitación + escurrimiento) de cierta magnitud β_1 , β_2 son ingresos si la cantidad total de agua se ubica arriba o abajo de la condición frontera. Comúnmente, para un agricultor **neutro** al riesgo, el objetivo es maximizar los ingresos. Para un agricultor **adverso** al riesgo, el objetivo es maximizar la utilidad asociada con las actividades agrícolas y los recursos.

En términos de riesgo (probabilidad de falla) el algoritmo procede como lo señala la Figura 6.7 en donde la cantidad de escurrimiento producido en cada una de las RES resultantes como viables, es analizado acorde a :

$$R = \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^n \quad 6.13$$

donde R es el riesgo, Tr = periodo de retorno del evento y n es el intervalo de tiempo considerado (dos años para el presente caso)

En la Figura 6.7 se puede observar que para el suelo medio para un incremento diferencial en escurrimiento el riesgo aumenta considerablemente por lo que los usuarios con éstas características, en la región de estudio, se considerarían como **tomadores de riesgo**. Esto es en virtud de que no existe un incremento sustancial en beneficio neto al incrementar la RES, (véase Figura 6.5), sin embargo, un incremento unitario en la RES implica mayor inversión que dadas las características climatológicas de la región de estudio no es conveniente realizar (véase Cuadro 6. 2).

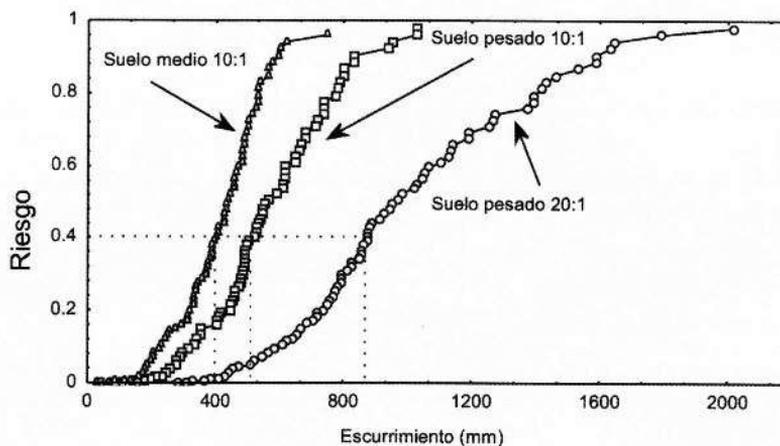


Figura 6.7: Análisis de riesgo para los RES resultantes de las simulaciones

Así entonces para la región se recomienda utilizar suelos pesados con RES entre 10 :1 y 20 :1 ya que son las que representan menos riesgo en términos de ingreso neto

Cuadro 6.2 : Condiciones climáticas para la región de estudio en el periodo de crecimiento del cultivo maíz.

PERIODO	PROBABILIDAD DE UN DIA CON LLUVIA DADO QUE EL DIA ANTERIOR NO LLOVIO
JUNIO - JULIO	0.1087
JULIO - AGOSTO	0.1147
AGOSTO - SEPTIEMBRE	0.1040
SEPTIEMBRE - OCTUBRE	0.0873

6.5 El costo del riesgo

El costo del riesgo en los sistemas productivos bajo incertidumbre climática se puede medir en términos del valor de las prácticas alternativas que garanticen una mayor estabilidad en el ingreso. Para poder estimar este costo, es necesario obtener la función de utilidad del sistema bajo estudio. La función de utilidad puede ser definida como una relación matemática que expresa la cantidad de satisfactores derivados de varios niveles de ingreso. Así, si el productor es neutral al riesgo, la utilidad es una función lineal del nivel de ingreso.

Dada la función de utilidad, el costo del riesgo puede ser estimado como:

$$C = R \left[\frac{\sigma^2_y}{2Y} \right] \quad 6.14$$

donde σ^2 y es la varianza del ingreso anual Y , R es un coeficiente de la aversión relativa al riesgo el cual se define en términos de derivadas de la función de utilidad del productor.

Capítulo VII

Análisis de Sensibilidad en Modelos de Simulación

Como se asentó con anterioridad, se entiende por simulación hidrológica como el procedimiento mediante el cual las diferentes fases del ciclo hidrológico son representadas por un sistema simplificado. Dependiendo de la estructura conceptual del proceso a ser modelado, la simulación pudiera dar luz de las interrelaciones «ocultas» en los procesos modelados.

En el capítulo V se observó que la evaluación de un modelo comprende cinco pasos esenciales dentro de los cuales, el análisis de sensibilidad adquiere relevancia cuando se pretende conocer el comportamiento de los modelos bajo rangos de valores de sus parámetros.

7.1 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad de modelos es una herramienta de modelación que, si se usa adecuadamente, pudiera proveer al modelador de un mejor entendimiento de la relación entre el modelo y el proceso físico modelado. La sensibilidad de los componentes y parámetros del modelo es potencialmente útil en las cinco fases descritas que

comprende la evaluación de los modelos.

Se puede definir al análisis de sensibilidad como la tasa de cambio de un factor con respecto al cambio de otro factor lo que implica un cociente de dos diferenciales, a saber:

$$S = \frac{\partial F_o}{\partial F_i} \quad 7.1$$

Este método de cuantificar la sensibilidad de los modelos al cambio en parámetros requiere del conocimiento de la estructura matemática del modelo en términos de poder diferenciar el parámetro (o variable) de interés con respecto a otro parámetro.

Un método alternativo (más comúnmente usado), consiste en la perturbación de los factores de interés incrementándolos ó decreciéndolos en cierta cantidad y calculando el impacto en la variable a la que se le desarrolla el análisis de sensibilidad.

Lo anterior pone de manifiesto que el análisis de sensibilidad pudiera adquirir dos matices: Determinístico y estocástico

7.1.1 Análisis de sensibilidad determinístico

Varios autores mencionan que una vez que los parámetros del modelo en cuestión han sido identificados, el análisis de sensibilidad determinístico procede manteniendo dichos parámetros constantes y variando solo uno hacia arriba y hacia abajo de un determinado valor prefijado. Si una pequeña perturbación en el parámetro de entrada se refleja en una gran perturbación en las variables de salida del modelo, se dice entonces que el modelo es altamente sensible a esa variable.

El anterior método asume que existe una correspondencia lineal entre la superficie de respuesta de la salida de la variable de interés del modelo y el espacio de valores que es explorado por las perturbaciones. Un análisis de **sensibilidad local** consiste en obtener la derivada parcial de cada variable de salida con respecto a cada parámetro. Este método asume también que cada parámetro tiene igual importancia en el compor-

tamiento global del modelo.

Análisis de regresión y sensibilidad del modelo: El coeficiente de correlación de Pearson se utiliza para indicar la asociación lineal entre dos variables como:

$$R = \frac{(\sum xy)}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \quad 7.2$$

donde «x» es la diferencia entre las variables aleatorias «X» y el valor medio de «X», «y» es la diferencia de «Y» y el valor medio. El cuadrado del coeficiente de correlación representa la proporción de la varianza de «Y» que puede ser atribuida a su regresión con «X».

Existe una fuerte similitud estructural entre el análisis de regresión y la sensibilidad del modelo. El coeficiente lineal de regresión «b» puede ser determinado del coeficiente de correlación y las desviaciones estándar de «X» y «Y»:

$$b = \frac{\sum xy}{\sum x^2} = \frac{RSy}{Sx} \quad 7.3$$

esta ecuación establece que para valores de «R» cercanos a la unidad, los cambios en «X» producirán comparativamente largos cambios en «Y». Así entonces, para una ecuación de regresión lineal que relaciona dos variables aleatorias, la sensibilidad de la variable dependiente «Y» en función de la variable independiente «X», puede ser determinada por medio de la diferenciación de la ecuación de regresión con respecto a «X»:

$$\frac{\partial Y}{\partial X} = b \quad 7.4$$

La anterior ecuación indica que el coeficiente de regresión representa la tasa de cambio en «Y» con respecto al cambio en «X». Se ha encontrado también, que los parámetros más sensibles de un modelo se correlacionan mejor con datos observados.

7.1.2 Análisis de sensibilidad estocástico

El análisis de sensibilidad determinístico de modelos variantes en tiempo y no lineales, es difícil debido a las soluciones complejas analíticas de las ecuaciones del modelo. Además, los modelos determinísticos producen una sola salida para una sola entrada ignorando el efecto de la estimación imprecisa de los parámetros y la variabilidad del sistema.

En los modelos descritos anteriormente, sus parámetros de entrada son representados por un rango de valores que siguen una función de distribución determinada los que a su vez producen un rango o función de distribución de salida. Cualquier sistema real contiene variabilidad natural por lo que el comportamiento del sistema se puede representar más realísticamente por una función de distribución del comportamiento potencial siendo la distribución del comportamiento del sistema el resultado de las características matemáticas del modelo y las distribuciones de los parámetros del mismo. Para poder tener en cuenta la imprecisión en la estimación de los parámetros del modelo, es necesario utilizar técnicas de modelación estocástica en vez de aproximaciones determinísticas.

El propósito del análisis de sensibilidad estocástico es el de cuantificar el impacto que un determinado parámetro tiene sobre alguna variable de salida del modelo en un rango de valores del parámetro posibles de ocurrir. Este método particiona la varianza observada en la variable de salida sobre los parámetros.

El método Monte-Carlo: Este método es el más comúnmente usado para realizar análisis de sensibilidad estocástico (otros métodos son: el analítico y el método delta). Monte-Carlo, selecciona aleatoriamente de una función de distribución probabilística determinada. Para estudios meramente analíticos, es preferible utilizar la distribución normal. Para casos en los que se desconoce la función de distribución de los parámetros, se recomienda utilizar la distribución uniforme (véase capítulo V).

Para hacer explícito el método que aquí se expone, a continuación se discute el método Monte-Carlo haciendo uso de un modelo de simulación desarrollado por Sanchez

et.al. (1994) en el que se evalúa un sistema de captación de agua de lluvia y en el que se incluye una subrutina para el cálculo de evapotranspiración actual.

Con fines de ejemplificar el método Montecarlo, a continuación se expone el modelo de Reddy (1983) para estimar la evapotranspiración actual de cultivos. El modelo de Reddy establece que:

$$AE_i = \left[\frac{1 + (5 - Ev_i)}{16} * \frac{t_n^{0.5}}{Ev_i} \exp \frac{-tn + a}{bn * k} \right] * Ev_i \quad 7.5$$

donde «*tn*» es un factor de tiempo, «*a*» es un factor de evaporación potencial, «*bn*» es un coeficiente por etapa de crecimiento del cultivo, «*k*» valor crítico de humedad en la zona de transpiración. En el modelo de Sánchez et. al. (1994), la relación del rendimiento actual «*Ya*» y la evapotranspiración actual «*Ae*» está dada por Doorembos y Kasam (1979) como:

$$1 - \frac{Ya}{Ym} = Ky * \left(1 - \frac{Ae}{ETm} \right) \quad 7.6$$

donde «*Ym*» es el rendimiento máximo cuando ocurre «*ETm*» (evapotranspiración máxima) y «*Ky*» es un factor de reducción de rendimiento.

El ejemplo aquí descrito, asume que la precipitación en la estación de crecimiento sigue una función de distribución exponencial del tipo (ecuación 5.34 del capítulo 5):

$$F_X(x) = P(X \leq x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad 7.7$$

donde λ es el inverso de la media de precipitación.

El procedimiento consiste en generar un número aleatorio entre 0 y 1, ($U[0,1]$) si éste número aleatorio es menor o igual a la probabilidad de tener un día húmedo dado que el anterior día fué seco (PWD), se genera otro número aleatorio y es sustituido en (ecuación 5.35 del capítulo V) :

$$x = -\left(\frac{I}{\lambda}\right) \ln[1 - U] \quad 7.8$$

donde «x» es la precipitación en mm y U es el número aleatorio. Los procedimientos para la generación de $U[0,1]$, fueron descritos en el capítulo V.

La probabilidad condicional PWD es obtenida mediante el método de la matriz de transición en el que la precipitación es dividida en dos estados: seco y húmedo lo que en forma matricial es expresado como: (véase figura 6.2 del capítulo 6)

$$\begin{array}{cc} n_{00} & n_{01} \\ n_{10} & n_{11} \end{array} \quad 7.9$$

En la anterior matriz, n_{00} es el número de veces que en la base de datos de precipitación diaria un día seco es seguido por otro día seco, n_{01} es el número de veces que un día seco es seguido por un día con lluvia, n_{10} es el número de veces que un día con lluvia es seguido por un día seco y n_{11} es el número de veces que a un día con lluvia le sigue otro día con lluvia (véase ecuaciones 6.3 y 6.4 del capítulo 6).

La anterior matriz se usa posteriormente para derivar la matriz transicional de probabilidades como:

$$\begin{array}{cc} P_{00} & P_{10} \\ P_{01} & P_{11} \end{array} \quad 7.10$$

Así entonces, como ejemplo a continuación se expone la matriz de transición para el periodo de tiempo del 15 de junio al 15 de julio para la estación climatológica del CENID RASPA en la Comarca Lagunera:

$$\begin{array}{cc} 0.8912 & 0.6866 \\ 0.1087 & 0.3134 \end{array} \qquad 7.11$$

De la matriz anterior se puede observar que $p_{00} + p_{10} = 1$ y $p_{01} + p_{11} = 1$.

La función de distribución de la evaporación diaria es normal (ecuación 5.36 del capítulo 5):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \qquad 7.12$$

Aquí, se utiliza un proceso Markoviano de cero orden para la generación de valores sintéticos de evaporación como:

$$x = \mu + \sigma * r \qquad 7.13$$

Para generar valores aleatorios de evaporación, se utiliza:

$$r = (-2 \ln(U_1))^{0.5} * \cos(2\pi(U_2)) \qquad 7.14$$

donde U_1 y U_2 son números aleatorios generados mediante la distribución uniforme, $U(0,1)$.

Al realizar «n» número de simulaciones con el modelo teniendo como entrada los parámetros de las funciones de distribución antes descritas y como salida al rendimiento del cultivo, se obtuvo el siguiente modelo de regresión:

$$Y = b_0 + 0.794 * PP + 0.054 * Ev \quad 7.15$$

Utilizando la ecuación 7.4, el análisis de sensibilidad local indica que:

$$\frac{\partial Y}{\partial PP} = 0.794$$

y

$$\frac{\partial Y}{\partial Ev} = 0.054$$

Para la obtención de índices normalizados de sensibilidad, se utiliza el modelo de regresión normalizado como:

$$\frac{Y - Y_m}{S_y} = \beta_1 \frac{X_1 - X_{1m}}{S_{x1}} + \beta_2 \frac{X_2 - X_{2m}}{S_{x2}} + \dots + \beta_n \frac{X_n - X_{nm}}{S_{xn}} \quad 7.16$$

donde β_j es el índice normalizado de sensibilidad del parámetro X_j , $j = 1, 2, \dots, n$. El coeficiente β_j ajusta el parámetro estimado de la pendiente «b» por el cociente de la desviación estándar del parámetro del modelo (variable independiente) y la desviación estándar de la salida del modelo (variable dependiente), como:

$$\beta_j = b_j \frac{S_{xj}}{S_y} \quad 7.17$$

De ésta manera para las dos variables independientes del ejemplo en cuestión se tiene:

$$\beta_{PP} = 0.794 \left[\frac{2.07}{1.83} \right] = 0.898$$

y

$$\beta_{Ev} = 0.054 \left[\frac{2.63}{1.83} \right] = 0.077$$

Lo anterior quiere decir que a un cambio equivalente a una desviación estándar en la precipitación de entrada al modelo, repercutirá en 0.898 desviaciones estándar en la salida (rendimiento) del modelo; y, a un cambio de una desviación estándar en la entrada de evaporación, repercutirá en 0.077 desviaciones estándar en la salida del modelo. Esto indica que el modelo es más sensible a cambios en precipitación que a cambios en evaporación por lo que se deberá poner especial atención a las bases de datos que contemplen esta variable para así evitar la propagación del error en la operación del modelo.

Capítulo VIII

Sistemas de captación de agua de lluvia

En ecosistemas caracterizados por incertidumbre climática es necesario buscar mecanismos que minimicen el riesgo por la carencia de agua para los diferentes usos. La captación de agua de lluvia o cosecha de agua es una estrategia que ha sido usada por los nativos de varias naciones desde hace cientos de años y ha mostrado ser un mecanismo eficiente para sobrellevar el déficit hídrico.

Diversas metodologías han sido propuestas para el óptimo diseño de sistemas de captación de agua teniendo la mayoría de ellas fundamento empírico, otras son producto de ajuste estadístico entre variables (regresión) lo que restringe su aplicabilidad en regiones hidrológicamente diferentes al lugar donde fueron obtenidas (Oweis, *et al* 1999).

Las técnicas de diseño de obras de captación de agua de lluvia para uso agropecuario, se fundamentan en dos criterios generales:

- a) Cuando el suelo va a ser usado como almacén y
- b) Cuando el escurrimiento se almacena para posterior uso

El primer criterio se circunscribe a las modificaciones al medio físico para que el agua sea aprovechada "in situ"; es decir, el almacén de humedad dependerá básicamen-

te de la capacidad de retención del suelo. En el segundo caso, se utilizan cisternas de almacenamiento para consumir los excedentes de precipitación en épocas de déficit. La magnitud de la obra en ambos criterios depende de la ocurrencia de precipitación acorde al déficit existente en el lugar de interés. La figura 8.1 muestra el balance entre precipitación y evaporación (considerando ésta última como evapotranspiración del cultivo) para una zona de temporal del norte de México; el área entre curvas constituye el déficit que hay que solventar mediante la obra de captación.

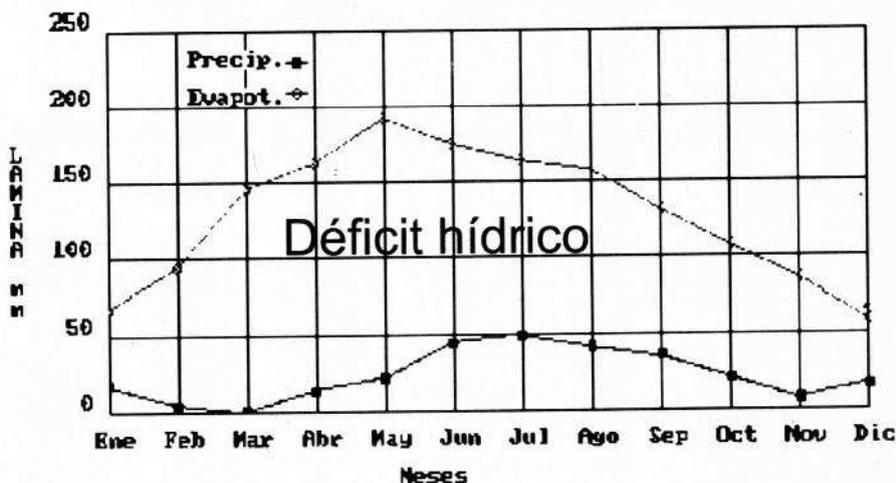


Figura 8.1: Déficit de precipitación que habría que solventar mediante obras de captación de agua de lluvia

Cuando el agua de lluvia se utiliza además para fines domésticos, habría que añadir al déficit señalado los requerimientos diversos como consumo humano, pecuario, paisaje, etc.

8.1 Aproximación para el análisis

La Figura 8.2 esquematiza el seguimiento para el análisis de factibilidad de sistemas de captación de agua de lluvia en el que diversos escenarios físico-climáticos son analizados, y en el que el balance de agua es una herramienta útil en el proceso de

contabilizar entradas y salidas al sistema.

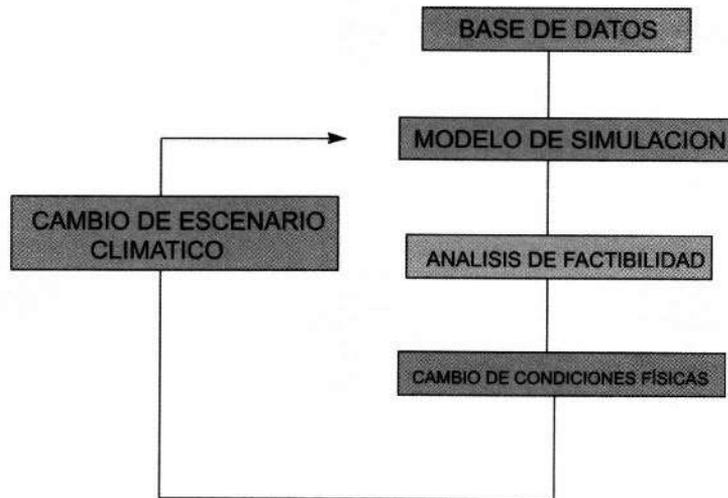


Figura 8.2: Esquema general para análisis de riesgo en obras de captación de agua de lluvia

Modelación de sistemas de captación de agua

Todo método para el diseño y evaluación de sistemas de captación de agua de lluvia, se fundamenten en la ecuación general del balance de agua. Las diferencias en los métodos estriban en los algoritmos utilizados para la cuantificación de las variables de esta ecuación; así, como se detalla posteriormente, los métodos se pueden agrupar en dos grandes rubros:

- métodos físicos
- métodos empíricos

La ecuación general del balance de agua continuo para obras de captación es descrito como:

$$SM_{(i)} = SM_{(i-1)} + P_{(i)} + RO_{(i)} - (ET_a + DP)_{(i)} \quad 8.1$$

donde:

SM = contenido actual de agua en el suelo (L^3)

P = precipitación (L)

RO = escurrimiento (L)

ETa = evapotranspiración actual (L)

DP = percolación profunda (L)

i = subíndice que indica el No. de día

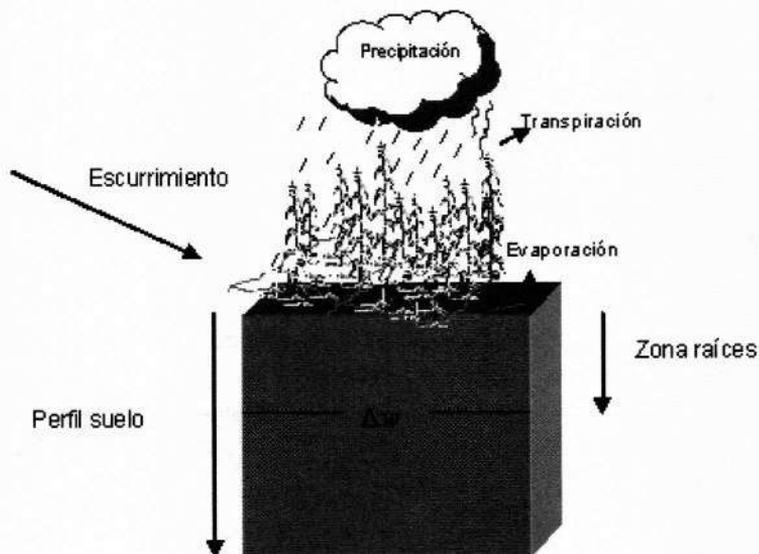


Figura 8.3: Variables involucradas en el balance de agua en sistemas de captación de agua de lluvia

8.1.1 Flujo Vertical

Acorde a Boers *et al* (1986), cuando se trata de flujo no saturado, el componente de movimiento del agua en el perfil de suelo se puede restringir a flujo vertical bajo condiciones no saturadas; esto es descrito por la ecuación de Darcy como:

$$q = -K(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} \right] + 1 \quad 8.2$$

Donde q es el flujo ($L^3L^{-2}T^{-1}$); $K(h)$ es la conductividad hidráulica (LT^{-1}); h potencial de presión del suelo (L); y z es la profundidad. La variación de la humedad del suelo con la profundidad se describe como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial w}{\partial t} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = C \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right] \quad 8.3$$

Donde w es el almacenamiento de humedad en el suelo (L); θ es el contenido volumétrico de humedad (L^3L^{-3}); $C = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ / h capacidad de humedad del suelo (L^{-1}); y t es el tiempo (T).

La ley de conservación de la masa establece que:

$$C \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right] = - \left[\frac{\partial q}{\partial z} \right] - \xi_r \quad 8.4$$

Donde ξ_r es el volumen de agua que sustrae el sistema radicular del cultivo por unidad de tiempo y volumétrica del suelo. Así, combinando las ecuaciones 8.2 y 8.4, resulta en:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{C(h)} \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - \frac{\xi_r(h)}{C(h)} \quad 8.5$$

Existen diferentes maneras de expresar la función para ξ_r , así por ejemplo, Brisson *et al* (1992) integra los dos componentes del crecimiento radical: profundidad (z), densidad de raíces. En su estudio asientan que la disponibilidad biológica (W_b) para extracción por las raíces es:

$$W_b = \int_{z=0}^{z_r} F(z) dz \quad 8.6$$

Donde $F(z)$ es la función de extracción de agua por las raíces cuya parametrización depende de la arquitectura del sistema radicular. Se asume que arriba de la profundidad de laboreo del suelo (40 – 60 cm) la raíz es capaz de extraer toda la humedad disponible entre los límites de capacidad de campo (θ_{cc}) y punto de marchitez permanente (θ_{pmp}). La correcta simulación del crecimiento y extracción de agua por el sistema radicular es función de la pendiente de la función que se elija para representarlo i.e. $F(z)$

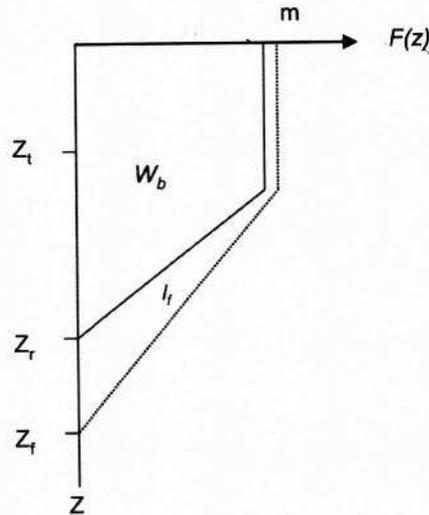


Figura 8.4: Evolución del crecimiento radicular: z , es la máxima profundidad posible (función del suelo), z_r profundidad genética (función de la especie) máxima, l_f es la pendiente de la función $F(z)$

y "m" es el cociente entre humedad disponible (W_{av}) y disponibilidad biológica (W_b).

Si "S" es un factor de estrés entonces:

$$S = 1 \text{ para } \frac{W_{ab}}{W_b} > S \quad 8.7$$

y

$$S = \frac{1}{s} \left(\frac{W_{av}}{W_b} \right) \text{ para } \frac{W_{av}}{W_b} \leq s \quad 8.8$$

El factor "s" depende de la función fisiológica y la demanda evapotranspirativa :

$$s_t = 0.94 + \left(0.26 \frac{\psi_{cr}}{E_o} \right) \quad 8.9$$

Donde ψ_{cr} es un factor crítico del potencial de la hoja (varía de -8 a -12 bars, un valor de -10 sería una buena aproximación para la mayoría de los cultivos), y E_o es la evapotranspiración potencial.

Acorde a Feddes (1988), ξ_r se puede obtener como:

$$\xi_r = \alpha(h) \xi_{\max} \quad 8.10$$

Donde $\alpha(h)$ es la función de retención de humedad del suelo y ξ_{\max} es la máxima tasa de extracción radicular; por otro lado:

$$\xi_{\max} = \frac{T_{\max}}{|z_r|} \quad 8.11$$

Donde T_{\max} es la tasa máxima de transpiración del cultivo, ($K_c E_o$), (LT^{-1}), K_c es un coeficiente de cultivo, z_r como lo define la Figura 8.4 es la máxima profundidad de raíces (L).

8.1.2 Escurrimiento

En modelos de simulación, el escurrimiento en un área dedicada para ese fin para abastecer al área de cultivo en obras de captación de agua de lluvia, puede ser generado por varios mecanismos, los cuales pueden ser descritos por métodos empíricos o físicos; estos últimos, consideran la teoría del flujo en medios porosos saturados o no saturados.

8.1.2.1 Métodos físicos

Aplicando los principios de conservación de la masa y de momentum a un elemento de ancho unitario y longitud ∂x en donde ocurre escurrimiento las siguientes ecuaciones pueden derivarse:

a) Continuidad:

$$q = \frac{\partial A}{\partial T} + \frac{\partial Q}{\partial x} \quad 8.12$$

donde:

A = área (L^2)

T = tiempo

Q = volumen (L^3)

x = distancia (L)

b) Momentum:

$$\frac{\partial V}{\partial T} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(S_o - S_f) - \frac{Vq}{A} \quad 8.13$$

El primer término de la ecuación 8.13 indica aceleración; el segundo es el cambio de velocidad con la distancia (fuerzas inerciales) y el tercer término es el cambio de la altura del flujo con la distancia (fuerzas de presión). S_o es la pendiente causada por fuerzas gravitacionales; S_f es la pendiente de fricción causada por rugosidades; Vq es el flujo lateral.

Cuando las fuerzas inerciales y de presión dominan el flujo, entonces las ondas dinámicas controlan el proceso; cuando las fuerzas gravitacionales y de resistencia controlan el flujo, entonces las ondas cinemáticas controlan el fenómeno.

Para muchas situaciones de flujo superficial y para las condiciones de canales de varias cuencas, la ecuación de momentum puede ser simplificada de la siguiente manera:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = S_o - S_f \quad 8.14$$

Si se desprecia la variación del tirante a través de la distancia entonces se tiene que:

$$S_o = S_f \quad 8.15$$

Para el cálculo de S_o se puede utilizar la ecuación de Chezy, Darcy-Weisbach o la de Manning. Así entonces escribiendo Manning en forma paramétrica se tiene que:

$$q = \alpha h^m \quad 8.16$$

donde:

$$a = S^{1/2}/n$$

m = es función de la ecuación de resistencia usada; para Manning es 5/3 para Chezy es 3/2 y para Darcy-Weisbach es 3/2.

Incorporando la ecuación de momentum en la de continuidad y rescribiendo para su solución por diferencias finitas se tiene que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\alpha(\partial h^m)}{\partial x} = r \quad 8.17$$

donde:

r = precipitación en exceso y es precipitación menos infiltración (L)

Stone et. al. (1992) han sistematizado el anterior procedimiento en un programa computacional (IRS9) el cual puede ser utilizado para la simulación del escurrimiento en un plano de donde, mediante un hietograma de entrada, se obtiene un hidrograma que refleja las características físicas del medio en estudio. La figura 8.5 presenta una salida del modelo descrito anteriormente.

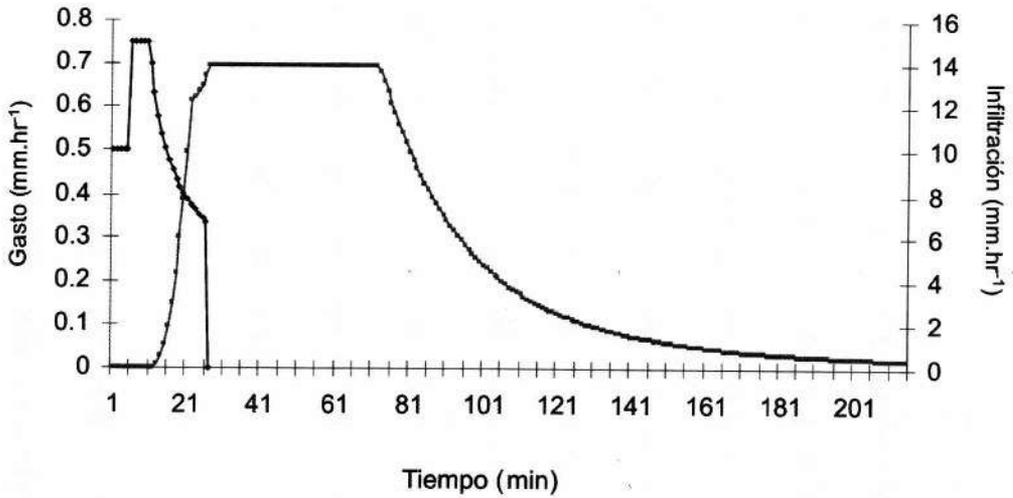


Figura 8.5: Hidrograma y función de infiltración para un suelo arcilloso con el modelo IRS9

Los datos de entrada al modelo de donde se obtuvo la gráfica 8.5 son:

Hietograma:

TIEMPO (min)	TASA (mm/hr)
0	10
5	15
20	8
25	0

Conductividad hidráulica a saturación $K(h) = 0.4 \text{ mm}\cdot\text{hr}^{-1}$

Potencial mátrico efectivo = 66.5 mm

Saturación = 45%

Cubierta vegetal = suelo desnudo

Longitud del plano = 100m

Pendiente del plano = 5%

8.1.2.2 Métodos empíricos

Acorde a Sánchez (1994), si se considera que un sistema de captación de agua de lluvia en donde el suelo es usado como almacén, está compuesto básicamente por una área de escurrimiento y otra de almacenamiento donde se recibe ese escurrimiento y que es donde se encuentra el cultivo, entonces la cantidad total de agua que recibe ésta última área por evento lluvioso estará dada por:

$$RO_i = P_i + [RES * (P_i - Th)] \quad 8.18$$

donde:

RES = Relación entre área de escurrimiento y área de siembra

Th = condición mínima inicial de humedad del suelo para que se inicie escurrimiento (L)

Las demás variables son como se definieron anteriormente.

Sánchez et al. (1995) han logrado definir funciones generales para el valor Th mediante el uso de un simulador de lluvia, las funciones obtenidas son:

para suelos ligeros:

$$Th = e^{1.407 - (0.032 * w_{i-1})} \quad R^2 = 0.70 \quad 8.19$$

para suelos medios:

$$Th = e^{1.267 - (0.042 * w_{i-1})} \quad R^2 = 0.52 \quad 8.20$$

para suelos pesados:

$$Th = e^{0.724 - (0.0260 * w_{i-1})} \quad R^2 = 0.60 \quad 8.21$$

donde w_{i-1} se refiere al contenido de humedad del suelo al final del día anterior (L)

Para la actualización del valor de «Th» diario en el área de escurrimiento, es necesario considerar la evaporación directa del suelo la cual según Sellers (1975) y Sánchez (1994) puede ocurrir en dos etapas:

a) Cuando el contenido de humedad del suelo es **mayor** que algún valor crítico predeterminado (regularmente una fracción de la capacidad de campo ó capacidad de campo), la evaporación del suelo ocurre a la tasa potencial (evaporación medida en un tanque evaporímetro tipo «A») y depende principalmente de factores meteorológicos.

b) Cuando el contenido de humedad del suelo es **menor** que el valor crítico preestablecido, la evaporación del suelo depende de su contenido de humedad con una relación que pudiera ser asumida lineal. Así entonces, para la primera etapa:

$$w_{i+1} = w_i - Ev_i \quad 8.22$$

Para la segunda etapa se tendrá:

$$w_i = a * w \quad 8.23$$

con:

$$a = \frac{Ev_i}{VC} \quad 8.24$$

donde:

w = es la fracción del contenido de humedad del suelo (L)

VC = es el valor crítico elegido (L)

Los subíndices se refieren al día actual (i) ó al día posterior ($i+1$)

De esta manera, para actualizar en forma diaria el valor de contenido de humedad del suelo en el área de escurrimiento, se usa la siguiente ecuación:

$$w_{i+1} = w_i - \left[\frac{Ev_i}{VC} w_i \right] \quad 8.25$$

Posteriormente se utiliza cualquiera de las ecuaciones 8.19 a la 8.21

8.1.3 Precipitación

La precipitación junto con el escurrimiento que esta genera, constituyen las entradas al sistema que señala la figura 8.3 por lo que su estimación es de crucial importancia en el proceso de la simulación de los sistemas de captación de agua de lluvia.

Como se trató en el capítulo V, evidencia estadística y empírica sugiere que el número de eventos (precipitaciones) por estación puede ser descrito por un función probabilística Poisson, (Karnieli, A. y Fogel, M. 1987). Los mismos autores sugieren que si el número de eventos por estación son en realidad descritos por una distribución Poisson, el tiempo entre eventos y la cantidad de precipitación es descrito por una distribución exponencial (ecuación 5.34 del capítulo V) :

$$f_R(r) = \lambda e^{(-\lambda r)} \quad 8.26$$

donde:

r = precipitación

λ = parámetro y es igual a: 1/media de los datos

Para generar valores aleatorios de precipitación, la ecuación 8.26 puede ser utilizada como: (ecuación 5.35, capítulo V)

$$r = \frac{\ln(u)}{-\lambda} \quad 8.27$$

donde «U» es un número aleatorio generado de una distribución dada como la distribución uniforme.

8.1.4 Evapotranspiración actual

La literatura reporta diversos métodos para el cálculo de evapotranspiración actual. Un método que presenta características deseables en términos de programación en computadora, es el modelo de Reddy (1983) en el que la evapotranspiración es dividida en 2 etapas:

a) bajo condiciones de no cultivo (antes de la emergencia) el suelo pierde agua por concepto de evaporación directa. Bajo esta condición, la tasa de pérdida de agua depende del tipo de suelo, la disponibilidad de agua en los primeros centímetros de suelo y la demanda evaporativa.

b) bajo condiciones de cobertura, el suelo pierde agua por concepto de evapotranspiración la cual depende del tipo de suelo, demanda evaporativa, disponibilidad de agua en la zona radicular y el tipo de cubierta vegetal a diferentes etapas de desarrollo.

Así entonces, la *ETa* es calculada como (Reedy, 1982, ecuación 7.5 del capítulo 7):

$$ETa = \left[\left[1 + \left(\frac{5 - Ev_i}{16} \right)^* \left(\frac{tn}{Ev_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right] e^{\frac{(-tn+a)}{bn*k}} \right]^* Ev_i \quad 8.28$$

donde:

tn = factor de suelo dependiente de la frecuencia de humedecimiento del suelo

a = factor de evaporación potencial

bn = factor de crecimiento de cultivo

k = capacidad de retención de humedad del suelo

Para percolación profunda, bajo condiciones de saturación, expresado saliendo en el fondo de la obra de captación por unidad de superficie, se utiliza la ecuación de Darcy (ecuación 8.2) como ya se ha explicado.

Sánchez (1994), ha sistematizado el método empírico descrito anteriormente en un programa computacional (GROWIN) el cual optimiza la relación área de escurrimiento - área de siembra como función de las características climáticas y físicas del sitio de estudio. La Figura 8.6 es un modelo conceptual del algoritmo.

También, Villanueva (1985) y Sánchez (1985), han propuesto un método empírico para optimizar la relación entre área de siembra y área de captación en un sistema de bordos anti erosivos como los que señala la Figura 8.6.

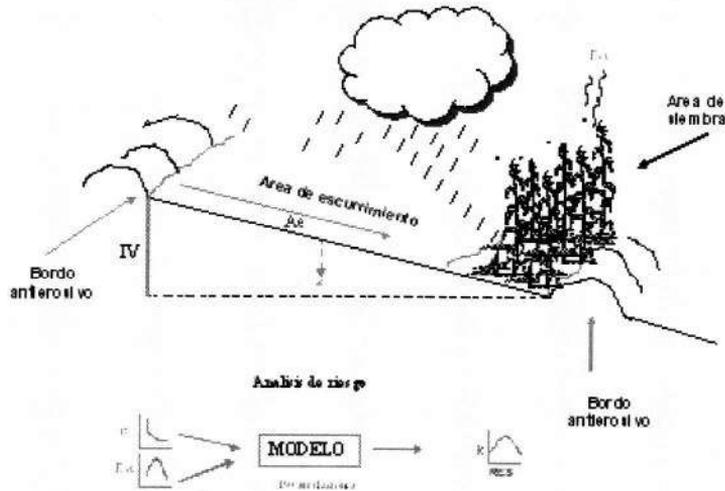


Figura 8.6: Modelo conceptual del algoritmo GROWIN (Sánchez, 1994)

$$L = \frac{\Phi(Pp)L_t}{N(\theta_t)\delta Z_r + (\Phi Pp - P_e)} \quad 8.29$$

Donde L es la longitud total del área de siembra, L_t es la longitud total entre bordos anti erosivos, Φ es el coeficiente de escurrimiento que a su vez es dependiente de la textura, cubierta vegetal y pendiente del terreno, N es el número de días con suficiente humedad después de una lluvia con magnitud suficiente para elevar el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo, θ_t es la humedad aprovechable del suelo entre los límites θ_{cc} y θ_{pmp} , Pp es la precipitación y Ppe es la precipitación efectiva. El Cuadro 8.1 muestra un ejemplo del procedimiento de cálculo de N .

Cuadro 8.1: Ejemplo del ordenamiento de información para el cálculo de “N”

ESTRATO	PATRÓN DE EXTRACCIÓN (•) (%)	HUMEDAD DISPONIBLE (Wave) (mm) ¹	ABATIMIENTO (• →) (mm.día ⁻¹) ²	TIEMPO DE ABATIMIENTO ³ (días)
0 - 25	40	31.6	1.9	16.53
25 - 50	30	31.6	1.4	22.57
50 - 75	20	31.6	1.0	33.26
75 - 100	10	31.6	0.5	67.23

¹ Se refiere a la humedad disponible por estrato; para un suelo homogéneo se calcula como:

$$W_{ave} = 0.75 \left(\frac{W_{avr}}{N_e} \right) \quad 8.30$$

Donde W_{avr} es la humedad disponible total y N_e es el número de estratos

² Se refiere al abatimiento de la humedad disponible por día (mm.día⁻¹):

$$\nabla_s = \Gamma_e d_d \quad 8.31$$

Donde Γ_e es el patrón de extracción y d_d es la demanda

³ Es el tiempo que tarda en abatirse la humedad disponible:

$$T = \frac{W_{av}}{\nabla_s} \quad 8.32$$

El estudio de esta tecnología en México no es nuevo y ha habido varios esfuerzos por ofrecer un paquete tecnológico a los productores agropecuarios del norte del país principalmente. Así, la Figura 8.7 señala un criterio de diseño para trampas de agua desarrollado por Velasco y Carmona, 1980; algunas de estas trampas han funcionado con éxito en los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Nuevo León, Coahuila, México y Jalisco.

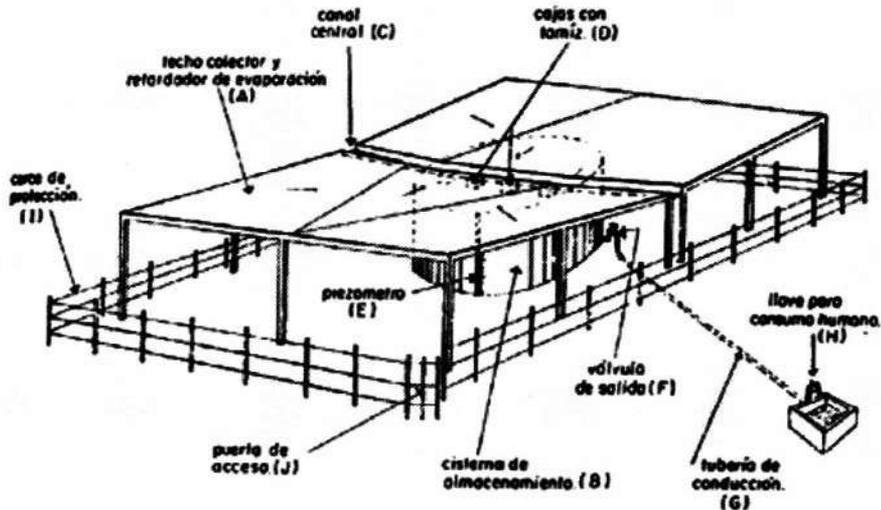


Figura 8.7: Techo cuenca como trampa de agua de lluvia

Otro prototipo de trampas de agua se muestra en la Figura 8.8. En ambos casos, existe una área de contribución (donde cae la precipitación) y un área para almacenamiento.

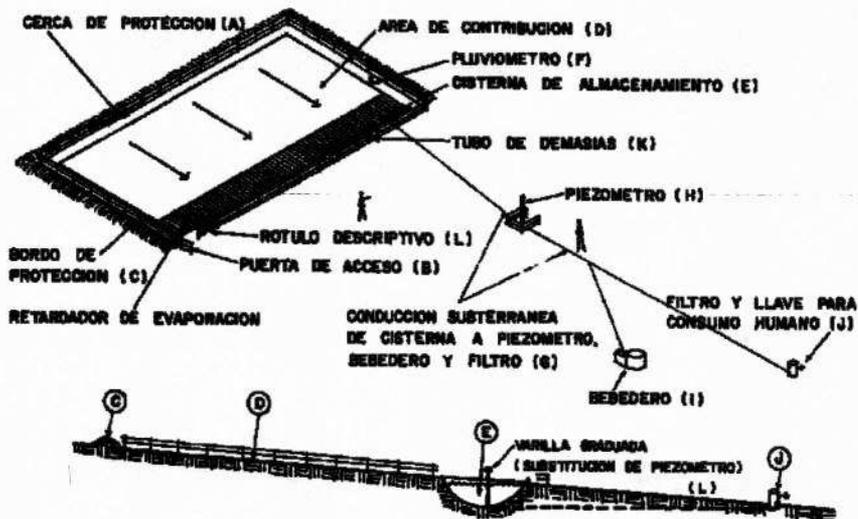


Figura 8.8: Trampa de agua de lluvia como cisterna (Velasco y Carmona, 1980).

Uso doméstico

Las zonas áridas se caracterizan por eventos de precipitación de alta intensidad y corta duración; en tal sentido, tratándose de aprovechamiento doméstico, la mayor parte del volumen que precipita se pierde por escurrimiento al no ser almacenado para posterior uso. Así, en algunos países desde hace tiempo el diseño de las casas habitación incluye la infraestructura necesaria para coleccionar esta agua de lluvia de los techos de las casas, caminos, y áreas que así lo permiten. Las siguientes figuras son una muestra de las propuestas del Distrito de Pima en Tucson Arizona en los Estados Unidos de Norte América para la colección del agua de lluvia.

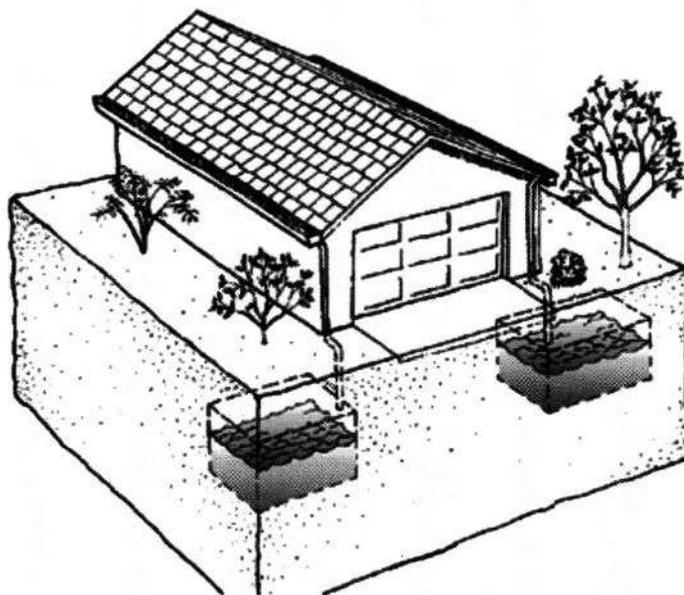


Figura 8.9: Almacenamiento subterráneo a dos aguas.



Figura 8.10: Almacenamiento superficial en tanques del agua colectada

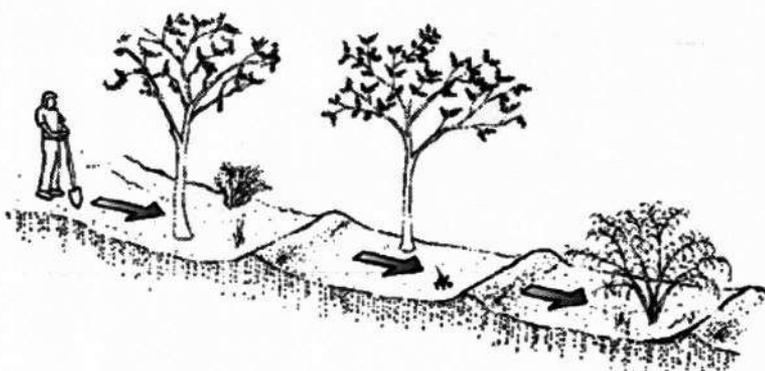


Figura 8.11: Aprovechamiento "in situ" del agua de lluvia en árboles y plantas nativas (Adaptado de Philips, 2003)

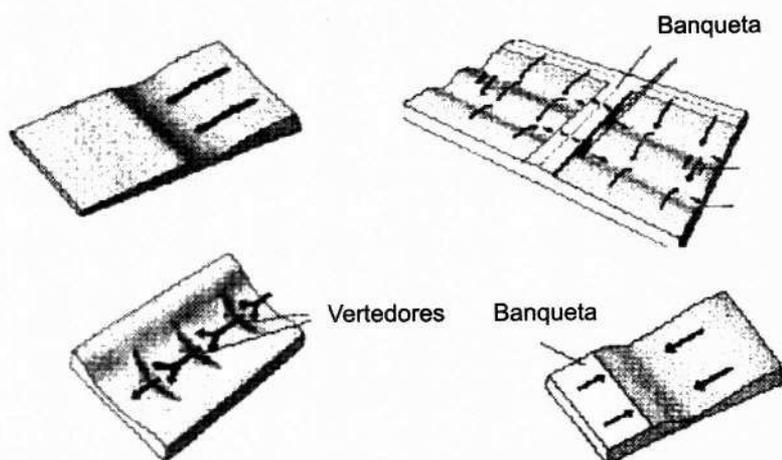


Figura 8.12: Aprovechamiento del agua de lluvia in situ en jardinería (Adaptado de Philips, 2003).

En los sistemas en donde el área de escurrimiento consiste en los techos de las casas habitación así como en los techos cuenca, de manera práctica para el cálculo de la tasa de escurrimiento a coleccionar se utiliza:

$$q = \Phi IA$$

8.33

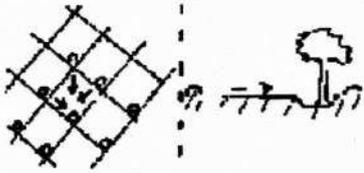
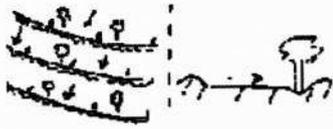
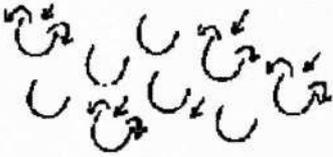
Donde “ q ” tasa de escurrimiento ($L^3 T^{-1}$), “ I ” es la intensidad de la precipitación ($L T^{-1}$) y “ A ” es el área de donde proviene el escurrimiento (L^2).

Como se ha asentado anteriormente, el éxito de una obra de captación de agua de lluvia estriba en su capacidad de solventar los requerimientos considerados en su diseño. En este contexto, el tipo y costo de las obras de captación dependen esencialmente del régimen pluvial de la región de interés. En un sentido hidrológico, a menor precipitación anual promedio en una región, mayor la incertidumbre (caracterizado por una alta desviación estándar); en estas regiones, para cultivos anuales, utilizar el suelo como almacén para producción agrícola, presenta un alto riesgo dado los costos implícitos en la construcción de la obra dado que se tendría que añadir un área considerable como captación para solventar el déficit hídrico (véase capítulo VI). Sin embargo, algunos pastos y cultivos resistentes al estrés hídrico, son buenas alternativas para este método de captación de agua de lluvia en cualquiera de sus variantes (Véase Cuadro 8.2)

Por otro lado, la construcción de cisternas de almacenamiento conlleva un elevado costo por lo que el análisis de factibilidad económica constituye una herramienta de decisión bastante útil.

En ambos casos, es necesario el exhaustivo análisis físico climático ex ante en aras de fundamentar la decisión. De igual manera, la investigación tiene aún muchas interrogantes por contestar.

Cuadro 8.2: Variantes de sistemas de Captación de Agua de Lluvia (Adaptado de Critchley, et al 1991)

TIPO MICROCUENCA	PRINCIPAL USO	DESCRIPCIÓN	CASOS EN QUE SE RECOMIENDA	MODELO CONCEPTUAL
Negarim	Árboles y pastos	Red cerrada en forma de rombos o de "V" formadas con bordos y área de infiltración	Donde el terreno está desnivelado o solo se desea plantar unos cuantos árboles.	
Bordos al contorno	Árboles y pastos	Bordos espaciados de 5 a 10 m	Para plantaciones de árboles a gran escala especialmente cuando la operación es mecanizada	
Bordos semi circulares	Forrajes y árboles	Bordos semi circulares es serie con una formación escalonada	Para resiembra de pastos o plantación de árboles en sistemas sobre pastoreados	
Fajas al contorno	Cultivos anuales	Pequeñas fajas al contorno separadas de 1.5 a 5.0 m con un área de escurrimiento y una de siembra	Para producción de cultivos en zonas semi áridas en suelos cultivables	

<p>Cuencas trapezoidales</p>	<p>Cultivos anuales</p>	<p>Microcuencas en forma de trapecio que capturan el escurrimiento</p>	<p>Para cultivos en general en zonas áridas y semi áridas</p>	
<p>Presas filtrantes</p>	<p>Cultivos anuales</p>	<p>Pequeñas presas de piedra transversales a la pendiente que dispersan el agua contribuyendo a remediar la erosión</p>	<p>Para lugares donde se tienen procesos incipientes de erosión. Donde se requiere de mejor redistribución del agua</p>	

Capítulo IX

La aproximación por cuencas

9.1 La cuenca hidrológica como unidad básica de planeación

La restauración de ecosistemas deteriorados no es posible sólo por medio de normatividad, cambios en las leyes, grandes inversiones o argumentaciones burocráticas. La recuperación de estas áreas sólo es posible si participan en su planeación los acreedores de intereses afectados y considerando la integración de factores económicos, ecológicos y sociales (NRC, 1999). Nuestra sociedad se ha vuelto cada día más inquisitiva en relación a la calidad del ambiente; sin embargo, poco o nulo es el conocimiento del impacto de nuestras acciones en el balance ecológico que define el estado de los recursos naturales. Más aún, siendo una sociedad con una alta dependencia del bienestar en actividades agropecuarias, debiera de ser un paradigma de estado la restauración, mantenimiento y conservación de la integridad física, química y biológica de los recursos naturales en los que el agua aparece como mecanismo vector y rector de las actividades económicas.

Acorde a los hechos, es claro que existe una sensibilidad incipiente a la preservación de estos recursos; sin embargo, es posible crear conciencia en la medida que los usufructuantes del patrimonio nacional sustenten su prosperidad económica en la calidad de sus productos que dependen en gran medida en prácticas de manejo que inte-

gran sistemas naturales y humanos. Es precisamente en este punto donde adquieren relevancia las cadenas productivas que sucintamente pueden ser definidas como los procesos involucrados en la obtención de satisfactores por sistema producto, considerando factores económicos, agronómicos, sociales y de mercado.

¿Por qué la cuenca hidrológica como unidad de planeación?

Las cadenas productivas ocurren bajo ambientes agro-ecológicos distintivos que definen su potencial. Ahora bien, ese ambiente se da por una serie de interacciones de clima, suelo y economía principalmente; de estos, el clima define por mucho la disponibilidad del recurso agua. Es por esto que una cuenca preferentemente debe ser definida por la capacidad de “generar” el recurso agua en función de sus características fisiográficas y ecológicas.

Por lo anterior, es necesario considerar a la cuenca hidrológica como unidad básica de planeación, teniendo como argumento los siguientes aspectos:

- Las interacciones complejas que ocurren en las cuencas requieren integrar objetivos institucionales y productivos para arribar a estrategias balanceadas.
- El proceso de toma de decisiones necesariamente debe involucrar a usuarios y técnicas de consenso para obtener un plan de manejo técnica y socialmente soportado que refleje el balance negociado de intereses.
- Necesidad de usar información generada, mediante estudios científicos para el rendimiento adecuado de los procesos que afectan a los ecosistemas, con impacto en las cadenas productivas y en las condiciones económicas y de salud de la población.
- El concepto tiene como objetivo el diseño y uso de métodos efectivos que involucren a todos los usuarios con beneficios y costos compartidos.
- Se busca un marco de acuerdos inter e intra institucionales (instituciones que participan con objetivos comunes en el proceso de dar sustentabilidad a los recursos naturales) que garantice la implementación de los planes desarrollados en el proceso de toma de decisiones, los cuales descansan más en el interés que en leyes.

- Necesidad de contar con un procedimiento de monitoreo que evalúe los efectos del manejo de la cuenca con mediciones y estándares bien definidos.

9.2 El desarrollo de investigación

Los paradigmas actuales institucionales buscan el desarrollo de investigación de gran impacto para lo cual se requieren de métodos de aproximación universales, es decir, el nivel de extrapolación de resultados o de métodos deberán impactar al mayor número de usuarios posible. De aquí, como ya se asentó, que se considere a la cuenca hidrológica como la unidad básica de la planeación de la investigación y de proyectos de desarrollo. En una cuenca hidrológica ocurren varios esquemas productivos como: producción de energéticos, alimentos, bienes de consumo directo (aspectos agrícolas, pecuarios y forestales) e indirectos (otros procesos industriales, producción de oxígeno, captura de carbono, ecología del paisaje, etc.). Cada uno de los bienes generados tiene su cadena de producción que involucra desde los materiales básicos necesarios para su transformación en leche, carne, granos, automóviles, etc., hasta la comercialización de los productos generados incluyendo aspectos socio- económicos. En lo que se refiere a la producción agropecuaria y forestal, las cadenas productivas se sirven de los recursos naturales para a su vez proveer de los satisfactores demandados por la sociedad. El ciclo se inercia en la medida que estos recursos se usen sustentablemente. Así, en términos de investigación, es necesario cuantificar el balance entre insumos y productos cuidando que estos no sobrepasen la potencialidad de la cuenca hidrológica para producirlos (Sánchez, 2003).

Es evidente que el recurso agua actúa como insumo esencial para las actividades sustantivas de la producción, por lo que es necesario su estudio detallado. En este sentido, el ordenamiento de la investigación en el contexto del manejo integrado del agua y sus interacciones, debe ordenarse como lo señala la Figura 9.1. En el gradiente que muestra esta figura, se esquematizan funciones que representan procesos o variables de decisión que tienen que ser cuantificados mediante investigación en el proceso de toma de decisiones. Los vacíos de conocimiento siempre darán la pauta para el planteamiento de las actividades de investigación mismas que deberán desarrollarse en parcelas o cuencas experimentales que representen la variabilidad espacial de los recursos así como su estado de deterioro.

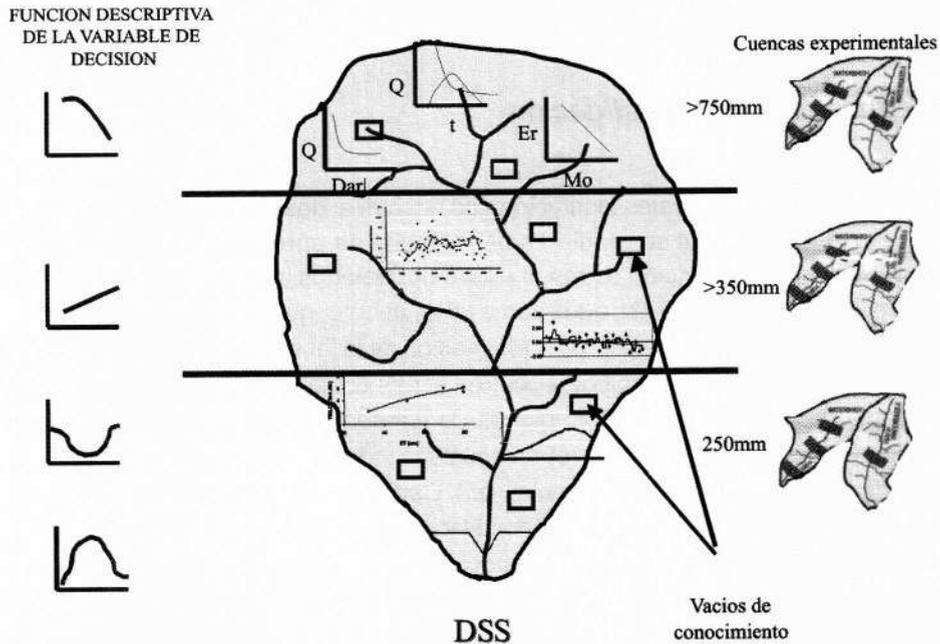


Figura 9.1: Ordenamiento de la investigación en la aproximación por cuencas hidrológicas (Sánchez, 2003)

Desde el punto de vista del desarrollo de investigación y acciones de servicio, se deben de considerar los principales factores que interactúan en una cuenca hidrológica, tomando ésta como unidad básica de planeación. De éstos algunos están bajo el dominio del usuario y otros son exógenos en los que poco o nula es su injerencia como es el caso de las decisiones políticas o la oportunidad del crédito (Moncada 2001). En esta unidad, se deben compartir por igual los beneficios y costos; por ejemplo, es deber del Estado el proveer servicios ambientales de calidad, sin embargo, es deber de los usuarios el coadyuvar a la conservación de los recursos naturales para que el ciclo tenga permanencia (Figura 9.2).

¿Cual es el nivel de impacto?

Como se ha asentado con anterioridad, el nivel de impacto es uno de los factores que definen en gran medida el costo del proyecto de investigación y en conjunción con el método de aproximación, define también su calidad; sin embargo, es deseable que el esfuerzo coadyuve al desarrollo y Sustentabilidad económica del mayor número de usuarios posible. Para esto, es necesario ubicar el problema o fenómeno objeto de la investigación (primer paso del método científico) analizando para tal efecto la escala y el sistema afectado. El planteamiento de la hipótesis de trabajo relativo a las causas o a las formas en que se produce el fenómeno que se desea estudiar constituye el segundo paso del método científico y requiere de especial cuidado en aras de optimizar el esfuerzo y recursos dedicados a la resolución de problema.

La elaboración del diseño experimental para corroborar esta hipótesis así como el desarrollo de la investigación y las conclusiones, conforman los pasos subsecuentes del método científico el cual es imprescindible en el planteamiento de cualquier estudio.

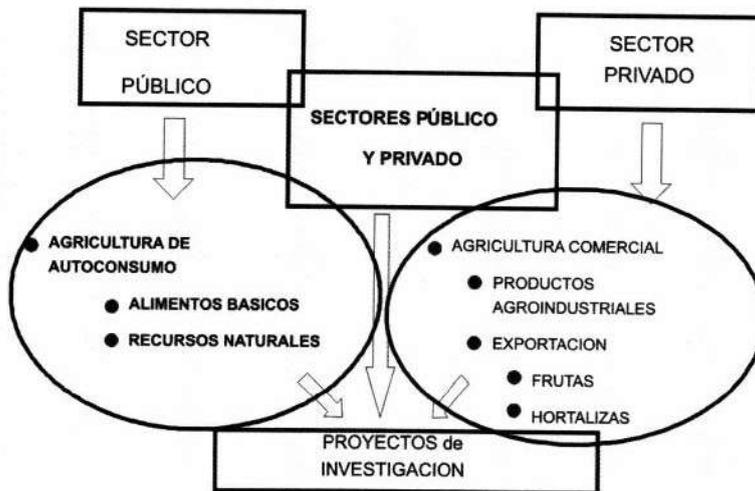


Figura 9.2: Interacción entre usuarios y beneficiarios de una cuenca hidrológica.

En investigación, para poder entender o explicar un fenómeno en las ciencias naturales, se deben realizar dos procesos: uno empírico, en el que se detectan en la realidad, los entes y los fenómenos que se desean estudiar y comprender. El otro teóri-

co, consistente en abstraer, creando un conjunto de ideas que representen los entes o los fenómenos reales observados; este último, permite hacer generalizaciones de lo aprendido. La investigación de impacto, busca poner especial cuidado en el manejo balanceado de estos procesos, ya que es un tanto falto de tino el generalizar sin medir (especular), como medir sin generalizar (pérdida de esfuerzo), (Fregoso, 1996).

Al proceso empírico pertenece la experimentación o investigación de impacto directo, y al proceso teórico la investigación de frontera o de amplio impacto. Sin embargo, ambos se sustentan en el método científico, por lo que su validez queda fuera de cuestionamiento.

Para fines de planeación de la investigación y el desarrollo de proyectos productivos, es pertinente dividir el área acorde a criterios de disponibilidad de agua en virtud de que el potencial y diversidad de las cadenas productivas es función directa de esto. Así, en la Figura 9.1 se puede apreciar en forma genérica que en el gradiente existen diferentes potenciales productivos, intereses, usuarios y, por lo tanto diferentes patrocinadores para el desarrollo de investigación. El proceso del planteamiento y desarrollo de líneas de investigación y proyectos productivos contempla entonces ese gradiente ubicando cuencas experimentales (áreas representativas de la condición natural, económica y social) para la obtención de información de calidad (Sánchez, 2003).

Mediante el diagnóstico adecuado de estas áreas se detectan vacíos de conocimiento que tienen que ser llenados mediante investigación. Las variables de decisión son especificadas en cada proyecto y contribuyen al desarrollo del conocimiento en el área específica. La finalidad en este esquema de investigación es conformar una base de datos robusta que permita la calibración de sistemas que auxilien en el proceso de toma de decisiones (DSS), (Heilman, et al, 2003).

Nivel de agregación para el desarrollo de la investigación en las cuencas hidrológicas

El país contiene una inmensa diversidad de paisajes con variaciones pronunciadas en su geografía física, clima y ecología así como una diversidad paralela en aspectos sociales y económicos. Esta variabilidad, aunada a los aspectos humanos, influye de manera significativa el funcionamiento de las cuencas, por lo que el plan de desarrollo de investigación, debe considerar estos aspectos para garantizar el nivel de impacto deseado.

También, las estrategias a seguir deben considerar el rango de escalas que define el ecosistema para el adecuado proceso de toma de decisiones. Así, las cuencas dividen el ambiente ecológico en unidades que pueden variar desde unos cuantos metros cuadrados hasta millones de kilómetros cuadrados, involucrando en el proceso de toma de decisiones para su manejo desde pequeños grupos con impacto en unas cuantas personas hasta la escala de gobierno federal cuyas decisiones impactan a millones. De igual manera, las fuerzas físicas que afectan a las cuencas ocurren en un rango de escalas muy variado. Así, una política certera de desarrollo requiere el entendimiento de los efectos que las variaciones en escala y alcance tienen en el manejo de cuencas.

La parte distintiva de una cuenca hidrográfica lo constituye la red de drenaje o la pendiente. Esta última, sirve como plataforma para los diversos usos de la cuenca desde forestal, agrícola, pecuario, hasta urbano. La red de drenaje es el conducto para el flujo del agua, sedimentos y químicos, y su forma y configuración refleja el balance temporal entre masa, energía hidráulica y geomorfología (Shultz 1973, Manning, 1987). De esta manera, el tamaño de las cuencas define su uso y en función de esto es la planeación y el desarrollo de investigación en ese contexto.

- **Cuencas pequeñas:** - desde unos cuantos metros cuadrados hasta un kilómetro cuadrado (100 ha) compuestas de pendientes simples en cuanto a su comportamiento hidrológico, y constituyen la fuente de agua y sedimentos. Con respecto al escurrimiento, su comportamiento está fuertemente influenciado por las características del suelo. El impacto de acciones del hombre en este tamaño de cuenca tiene una respuesta inmediata creando cambios físicos. Así, una celda de precipitación pequeña puede cubrir la cuenca por completo, produciendo en un período muy corto de tiempo, grandes cantidades de escurrimiento y erosión cambiando algunas características morfológicas de la cuenca en una o dos horas.
- **Cuencas intermedias:** desde unos cuantos kilómetros cuadrados hasta unos diez mil kilómetros cuadrados. Estas cuencas contienen sistemas del terreno más complejos (pendientes y redes de drenaje) en los que se llevan a cabo una gran variedad de procesos debido a que, a diferencia de las cuencas pequeñas, tienen suficiente área para el almacenamiento temporal de agua, sedimentos y contaminantes asociados. En estas cuencas, la red de drenaje experimenta considerables cambios y ajustes en forma natural, pero que pueden ser magnificados por las acciones del hombre. Su tamaño permite absorber la precipitación de tormentas individuales. Los procesos erosivos en algunas partes de estas cuencas son balanceados por la deposición en otras partes, aguas -

abajo del sistema. En este tamaño de cuencas se alcanza el «límite efectivo» de los intentos por controlar las avenidas.

- **Cuencas grandes:** aquellas mayores a diez mil kilómetros cuadrados que incluyen grandes áreas de deposición de sedimento y agua en las partes bajas. Por su extensión, incluyen gran diversidad del uso del suelo acorde a las diferentes actividades productivas. Debido a su extensión, pueden ocurrir cambios en sólo una parte del sistema con repercusión en el largo plazo en otras partes, obedeciendo a cambios hidrodinámicos globales. De esta manera, las acciones del hombre controlan poco estos sistemas (a diferencia de las dos categorías anteriores).

En el proceso de planeación y relativo al criterio de discretización (nivel de agregación) se debe considerar una propiedad importante de las cuencas: sus características y procesos no son aditivos. Es decir, las mediciones hidrológicas realizadas en una serie de cuencas pequeñas no pueden ser extrapoladas a cuencas más grandes que incluyen a éstas. Por otro lado, la discretización de cuencas es el paso preliminar a la definición de cadenas productivas potenciales. Esta potencialidad, la definen la disponibilidad de los recursos agua y suelo principalmente, por lo que el criterio para definir ambas debe ser complementario y no excluyente.

La concepción de la organización de las cuencas hidrológicas no es tan difícil como su implementación. En la medida que las definiciones físicas y políticas converjan, se facilitará la agregación y análisis de información económica, social y ambiental. La atomización (disgregación a su mínima expresión) de las cuencas, no es deseable a menos de que estas pequeñas áreas representen una característica distintiva sea hidrológica o social. Lo que se busca es el contar con unidades hidrológicas de comportamiento similar en donde desarrollar o potenciar las cadenas productivas (Jasso, 1998).

La escala temporal.

Las escalas geográficas y temporales están íntimamente relacionadas en los procesos que ocurren en las cuencas hidrológicas, de tal manera que la magnitud de los eventos que se dan en estos sistemas se correlacionen con la frecuencia con que estos ocurren, como en el caso de la precipitación, cuyos eventos más pequeños ocurren con más frecuencia que aquellos de grandes magnitudes. También, los escurrimientos más pequeños tienen mayores probabilidades de ocurrencia y el tiempo entre un evento y

otro es relativamente corto, comparado con los períodos de retorno de los eventos mayores (Sánchez, 1994). Así, en hidrología, la conexión entre el tamaño de los eventos y su probabilidad de ocurrencia se expresan en términos de magnitud y frecuencia.

Los factores físicos de las cuencas adquieren relevancia en función de la escala temporal que se utilice para su análisis, la cual a su vez es función del objetivo del análisis. Así por ejemplo, si se elige una escala de décadas o más, el orden de la red de drenaje sería sólo una variable sujeta a la influencia de los cambios en la geología (largo plazo) clima, vegetación, topografía y otros factores. Pero si se elige una escala anual, el orden y morfología de la red de drenaje en lugar de ser una variable de respuesta, se convierte en una variable de control que influencia el comportamiento hidrológico de la cuenca, por lo que sería necesario contar con bases de datos para la óptima planeación y uso de los recursos naturales agua y suelo.

La escala más conveniente en el manejo de cuencas hidrológicas es de décadas, puesto que a esta escala, se encuentra respuesta de las tres variables dependientes de más impacto en el estado de los recursos naturales: la forma de la red de drenaje, de la pendiente, y los escurrimientos y descarga de sedimentos. En términos de planeación y discretización, no es conveniente apoyarse sólo en una de estas variables por las altas interrelaciones entre ellas, lo que conlleva a contar con bases de datos pertinentes como las relaciones precipitación- escurrimiento. Quizás, una de éstas adquiera relevancia en función del objetivo de la planeación; sin embargo, los problemas se detectan al medir el cambio en el tiempo de una variable como función del cambio en la otra u otras.

9.3 Planeación multi objetivo considerando a la cuenca como unidad básica de planeación

¿Porque planeación multi objetivo?

El cuestionamiento lleva implícito la respuesta puesto que las personas encargadas de normar y tomar decisiones relativas al manejo de los recursos naturales, tienen que enfrentar interacciones complejas de índole social, económica y relacionada con la salud del ambiente. Esta situación conlleva a un cambio de escala que involucre a la unidad de planeación que es la cuenca hidrológica. Esta, en la más elemental de las

definiciones, consiste en una región delimitada por un parteaguas cuya red de drenaje termina en una obra de almacenamiento o cauce, (Webster, 1994).

Sin embargo, el manejo integrado adquiere una concepción más amplia que incorpora políticas, planes y actividades usadas para controlar el agua y los recursos y procesos con los que se asocia. Así, acorde al consejo de investigación de los E.U. A. (1999) (NRC, por sus siglas en inglés), el enfoque de manejo integrado tiene algunas características distintivas, a saber:

1. Busca balancear los objetivos institucionales con los del área de interés
2. El proceso de toma de decisiones estriba en involucrar a la representatividad del área de interés considerando la opinión de todos los participantes con la finalidad de alcanzar un plan de acción aceptado por la mayoría que refleje el balance negociado de intereses.
3. Utiliza información con fundamento técnico – científico para un mejor entendimiento de los factores hidrológicos y ecológicos que influyen la condición de la cuenca y que impactan la salud y sostenibilidad de los recursos naturales.
4. Intenta el uso y diseño de métodos efectivos con participación justa de todos los involucrados de tal manera que el costo de los proyectos, en términos de recursos financieros e impacto, se distribuyan de manera proporcional a los beneficios recibidos.
5. Crea un marco de acuerdos intra gubernamental e intra dependencia que garanticen la implementación de los planes desarrollados en el proceso de toma de decisiones y que se sustenta mas en el compromiso que en las leyes.
6. Incluye pasos para evaluar los efectos del manejo de la cuenca con estándares de fácil medición y bien definidos.

Planeación con fundamento técnico – científico

Actualmente en el país existe conocimiento científico (aunque no con suficiencia) y bases de datos de calidad para afrontar el proceso de planeación del manejo de cuencas de una manera acertada y efectiva. Sin embargo, estas herramientas carecen

de aplicación práctica para los tomadores de decisiones o usuarios en virtud de la poca difusión o la falta de táctica para hacer “entendible” los resultados científicos a la sociedad. Por otro lado, los usuarios no parecen entender la importancia del enfoque de planeación multi objetivo en las cuencas hidrológicas y por lo mismo, el financiamiento para el desarrollo de investigación queda restringido a problemas a nivel parcelario.

La mejor manera de convencer de la bondad de este enfoque es mediante indicadores de la condición de la cuenca.

Como se ha comentado anteriormente, la agricultura intensiva tiene por objeto la optimización (maximizar) de la producción al mínimo costo posible. En este tipo de agricultura productivista, si bien el enfoque está de acuerdo con las demandas y políticas productivas (sobretudo en países en vías de desarrollo), conlleva a la degradación de los recursos naturales al considerar la producción con visión “uniobjetivo” (De Sousa et al, 2001). Con esta premisa se ha dado impulso recientemente al término “sustentabilidad” de los recursos naturales cuyo enfoque es el de hacer una planeación de explotación de los recursos con enfoque multiobjetivo en donde al inducir un estímulo de producción a un elemento del sistema, no se vean alterados significativamente los otros elementos participantes los cuales no actúan de manera independiente.

Los elementos naturales que integran al sistema productivo son: Suelo, Agua, Planta y Atmósfera los cuales son afectados por acciones del Hombre (SAPA + H) ó SWAPA + H (por sus siglas en inglés). El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos desarrolló una técnica de planeación multiobjetivo que considera en forma integrada los elementos mencionados con la finalidad de que sus operadores (técnicos de asistencia técnica) consideraran al sistema del productor como un todo en donde al afectar un elemento del conjunto, los elementos restantes se ven afectados. En esta técnica, el usuario está directamente involucrado en el planteamiento y solución de su problema (NRCS, 1990). A este sistema de planeación multiobjetivo se le llamó SWAPA + H con el significado arriba anotado.

El proceso de planeación

Cualquier decisión está compuesta de ciertos constituyentes esenciales: la persona o usuario que tomará la decisión, el problema, el método para resolver el problema y la decisión.

En el proceso de planeación de explotación de los recursos naturales, es necesario considerar los elementos operativos que intervienen en la operación de la siguiente manera:

Identificación del problema

Determinar los objetivos

Inventario de los recursos

Análisis de la información

Formulación de alternativas de solución

Evaluación de las alternativas de solución

El usuario determina la acción

El usuario implementa el plan

Evaluación de los resultados del plan

1. **Identificación del problema:** En este primer paso comúnmente es el productor - usuario quien determina cuál es su problema; por ejemplo en una zona de riego éste problema pudiera ser que en la parcela se quedan zonas “secas” en donde por topografía o textura el cultivo no alcanza a abastecerse de agua. En otras ocasiones está en el asesor técnico el dilucidar, acorde al inventario de recursos, cual es el problema.
2. **Determinar los objetivos:** En este inciso el usuario puede determinar los objetivos una vez identificado el problema. Sin embargo, el asesor técnico deberá constar que el objetivo del usuario sea congruente con las políticas conservacionistas y ambientales. Es decir, la solución pudiera ser conveniente al usuario pero inconveniente aguas abajo de su predio o que promoviera contaminación subterránea.
3. **Inventario de los recursos:** Para poder proceder en la planeación multiobjetivo, es necesario conocer en forma cuantitativa los recursos con que se cuenta. Si este paso se obvia, se pudieran tomar decisiones en donde un incremento

diferencial de una acción impacta en gran porcentaje a un elemento del sistema. Por otra parte, pudiera haber objetivos contrapuestos por ejemplo, un incremento en el gasto de riego para lograr mayor avance pudiera promover mayor erosión. El inventario de los recursos también es necesario puesto que el problema pudiera venir de fuera. Se puede citar aquí el caso de mala calidad de agua de riego que provoca salinidad y/o lixiviación de elementos al subsuelo.

4. **Análisis de la información:** En éste se hace un análisis minucioso relativo al inventario de los recursos. Se corrobora la veracidad de la información haciendo muestreos en campo si así se cree pertinente.
5. **Formulación de alternativas de solución:** En este rubro se hace un listado de las soluciones posibles de acuerdo a los objetivos (los cuales deberán ser congruentes a las políticas conservacionistas y ambientales) y situación económica del usuario.
6. **Evaluar las alternativas de solución:** En este apartado el usuario determina cual solución es la más conveniente acorde a su situación. Se debe evaluar cada solución alterna con la finalidad de prever impactos negativos futuros; se pudiera elegir una alternativa que resolviera parcialmente el problema provocando uno de mayores magnitudes futuras.
7. **El usuario determina el curso de acción:** Una vez que se ha decidido la mejor alternativa, el usuario determina la ruta a seguir en cuanto a la implementación de la acción.
8. **El usuario implementa el plan:** Al implementar el plan, el usuario y técnico supervisan que la acción sea correctamente implantada en cuanto a la selección de materiales, movimiento de maquinaria, etc.
9. **Evaluación de los resultados del plan:** La evaluación de la acción se deberá realizar en términos de comparación entre la situación anterior al plan y posterior al mismo. Se deberá evaluar no sólo en términos de los logros obtenidos relativos a las variable (s) modificadas por la acción sino también en términos de estado de las variables o procesos aledaños al sistema. Es decir, si la acción fue la de incrementar el gasto de riego, se deberá evaluar además del avance de riego la erosión la cual deberá estar dentro de los límites permisibles del criterio de calidad usado.

9.4 Sistemas de manejo conservacionista.

La implementación de la metodología SWAPA + H requiere de la identificación plena del tipo de manejo del usuario. Este sistema pudiera ser el típico de la región o bien pudiera ser que por características intrínsecas del medio físico el sistema tuviera forma peculiar.

El estado más avanzado en cuanto al uso de las técnicas de planeación multi objetivo, lo constituyen los sistemas para el soporte de decisiones (DSS por sus siglas en inglés). Un DSS, como se trata en el capítulo X, es una técnica computacional compuesta por sistema experto, un modelo económico, una base de datos y una interfase los que en su conjunto ayudan al usuario a tomar la decisión correcta (óptima) en función de los objetivos perseguidos los cuales pudieran estar contrapuestos.

Para la integración de un DSS se deben identificar los principales sistemas de manejo en los que se estudia las repercusiones al sistema cuando una o más variables de entrada son cambiadas. Las variables de decisión deberán ser identificadas y cuantificadas mediante base de datos o modelos de simulación.

La matriz de efectos físicos en las prácticas de conservación

El servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos (SCS) desarrolló una matriz de efectos físicos en prácticas de conservación (FOTG por sus siglas en inglés). Esta matriz está dividida según el recurso usado (suelo, agua, planta o aire). La matriz está dividida para cada recurso en: Problema (cuál es el recurso problema, consideraciones y definiciones), Práctica (tipo de prácticas recomendadas según el problema) y Efectos (el efecto sobre el problema que tiene la práctica(s) elegida(s). Para cada alternativa, existe una descripción (NRCS, 1990).

Siguiendo los nueve pasos en el proceso de planeación señalados anteriormente se tiene por ejemplo: Se detectó que el recurso suelo es el problema en relación a erosión acanalada (pudiera haber sido el problema erosión eólica, erosión en cárcavas, movimiento de masas de suelo, erosión inducida por riego, flujos concentrados, etc). Algunas de las prácticas recomendadas existentes para el problema de erosión en general son: 1. ubicación de cercas, 2. construcción de bordos, 3. construcción de cortinas rompevientos, 4. fajas de cultivo, 5. estructuras estabilizadoras, 6. franjas con

pastos, 7. rotación de cultivos, 8. áreas protectoras, 9. nivelación de terrenos, 10. diferentes tipos de sistemas de riego, 11. protección de las áreas que son usadas intensivamente, 12. etc.

Puesto que se tiene bien identificado el problema (erosión acanalada) el proceso discriminante es relativamente sencillo. Al formular las alternativas de solución mediante la matriz de efectos físicos, se logran aislar 2 posibles alternativas de las existentes en virtud de que muchas de las soluciones tienen un efecto nulo o poco significativo en el problema. Por ejemplo, el efecto de una cortina rompevientos en la erosión acanalada sería prácticamente nulo; sin embargo, aparece en la matriz de decisión como una alternativa al problema de erosión en general. Así entonces las dos alternativas posibles son:

1. La rotación de cultivos: ésta práctica tiene un efecto significativo en el problema ya que reduce considerablemente la energía cinética del escurrimiento al incrementar el factor de rugosidad por efecto de diferentes cultivos (cubierta vegetal).
2. Protección de las áreas que son usadas intensivamente: esta práctica tiene un efecto moderado y significativo en el problema tratado porque al igual que la anterior protege las áreas más expuestas al problema de erosión acanalada.

Al evaluar las alternativas de solución (paso No. 6 del proceso de planeación), se decide por la alternativa No. 2 en virtud y acorde a la situación del usuario dado que la alternativa No. 1 aunque tiene un efecto significativo sobre el problema, involucra mayor gasto y el tiempo de respuesta pudiera ser más prolongado. Por otro lado, la alternativa No. 2 prevé la revegetación de solo el área problema. Para facilidad del entendimiento de esto se presenta la Cuadro 9.1

Cuadro 9.1: Evaluación del impacto (positivo o negativo) de las alternativas sobre los recursos naturales.

SWAPA				
	AGUA	SUELO	PLANTA	ANIMAL
ALT No. 1	+	-	-	+
ALT No. 2	+	+	-	-
ALT No. 3	+	+	+	+

Al evaluar los resultados el usuario cuantifica el problema y decide si la acción tomada fue la adecuada en función del criterio establecido de calidad.

La adecuación de la matriz de efectos físicos

La adopción del método de planeación multi objetivo, SWAPA + H a las condiciones socio-económicas de México presenta algunas desavenencias las cuales pudieran impedir la completa adopción si no se hacen las adecuaciones pertinentes. Sin embargo, cabe aclarar que el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 1992) ha desarrollado una matriz de efectos físicos para el trópico húmedo misma que a la fecha ha dado buenos resultados. Esta aproximación fue desarrollada tomando como base al método del SCS de los Estados Unidos habiendo contado también con la asesoría de personal de la misma dependencia norte-americana.

Falta aún por desarrollar el método a las condiciones del trópico seco de México. En su desarrollo se deberán considerar los siguientes 3 aspectos primordiales:

1. **La tenencia de la tierra:** En virtud de la heterogeneidad en cuanto a la tenencia de la tierra, las soluciones a problemas en el contexto de la planeación multi objetivo, deberán ser acordes a la organización comunal (si fuera el caso). Por ejemplo, en un ejido temporalero una posible solución al déficit hídrico sería la captación del agua de lluvia. Una estrategia acorde pudiera ser el trazo de bordos contenedores de agua de lluvia. En esta estrategia los agricultores ubicados aguas arriba del sistema serían los más beneficiados quedando al reza-go los agricultores aguas abajo sobre todo bajo condiciones de incertidumbre climática. Otro problema aunado a esto sería la inversión en virtud de que el tamaño de los predios no son necesariamente equivalentes, lo que pudiera parecer una solución "universal" dentro del sistema, pudiera no ser económicamente conveniente a la mayoría de los usuarios.

Quizá una solución acorde al sistema, pudiera ser la construcción de obras contenedoras de agua con acceso común en donde el funcionamiento estaría acorde a las regulaciones internas de los usuarios (paso No. 7 y 8 del método de planeación).

2. **Los estándares de calidad:** Es común encontrar estándares de calidad mayores en los países desarrollados que en los en vías de desarrollo. Esto obedece

quizá a la existencia de agencias gubernamentales que se encargan de establecer los criterios de calidad. Tal es el caso de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos la cual tiene estándares para la calidad del agua subterránea de tal manera que cualquier acción que incorpore materiales químicos al suelo en proporciones mayores a las permitidas, es ambientalmente no factible aunque sea la más viable en términos del problema a resolver (EPA; 1999).

En tal virtud la adecuación de método a nuestras condiciones deberá seguir las normas internacionales de calidad ponderadas por la fuente y uso del insumo.

3. **La situación económica:** La matiz de efectos físicos del SCS se basa en la tecnología disponible (liberada) por el mismo SCS y otras agencias de investigación. Estas estrategias asumen la disponibilidad de los elementos necesarios para implementar un plan de acción en el sistema productivo. En el caso de México se tendrán que hacer las adecuaciones necesarias a la disponibilidad de los recursos.

La creación de la matriz de efectos físicos

El esfuerzo desarrollado por el IMTA para el trópico húmedo relativo a la implementación del SWAPA + H, ha sido el adecuado en términos de la organización para la consecución de la matriz de efectos físicos. La guía por ellos desarrollada, refleja la experiencia acumulada durante 10 años en el trabajo de técnicos y productores de la región tropical. La amplia participación de los productores y sus familias así como la de los técnicos, hicieron posible la obtención del conocimiento de las unidades de producción características de la región así como sus interrelaciones con el medio externo.

Queda entonces claro que para la identificación de los problemas y de las soluciones acordes, el usuario debe participar completamente en conjunción con los técnicos encargados de prestar la asesoría.

La técnica SWAPA + H aplicada a investigación

Aunque SWAPA + H tiene fundamentos operativos, su filosofía pudiera adecuarse

a los objetivos de la investigación agropecuaria y forestal en términos de planeación; más aún, posee características similares al procedimiento común de investigación conocido como "MARCO DE REFERENCIA". En este último, el investigador se aboca al conocimiento, evaluación o inventario del recurso ligado estrechamente al problema que sustenta su hipótesis. La finalidad en este enfoque (marco de referencia) es el de detectar la causa del problema con visión productivista ó uniobjetivo.

En la técnica SWAPA+ H más que buscar la relación causa-efecto, se busca el estudio del entorno físico dentro del cual se ubica el problema. De esta manera se está en posibilidades de dilucidar interacciones en cascada de dos o más variables participantes en el fenómeno. Es común explicar resultados de investigación en términos de la fluctuación de la variable estudiada. Esto tiene validez cuando el entorno físico ha permanecido constante (clima controlado) durante el desarrollo del estudio. En términos de conocer el comportamiento de cada variable o parámetro en el contexto del fenómeno en estudio, es necesario conocer su participación relativa y cómo se afecta a un cambio diferencial de una o más variables involucradas.

En SWAPA + H la solución es multiobjetivo; es decir, se busca la erradicación o al menos la disminución del problema considerando las interrelaciones entre los recursos agua, suelo, planta, aire y hombre. Como se asentó anteriormente, se busca la armonía entre los recursos sin que la solución deteriore o disminuya el entorno.

Capítulo X

Sistemas de Ayuda en la Toma de Decisiones

10.1 El proceso de toma de decisiones

En el proceso de toma de decisiones, cuando se involucra a la sociedad de manera honesta, consistente ordenada y a tiempo que conciernen o impactan a los actores de la unidad de producción, el proceso garantiza la aceptación y desarrollo del proyecto que se trate (USSD, 2003).

Así, cualquier proceso de toma de decisiones debe involucrar ciertos componentes esenciales:

- la persona o usuario que tomará la decisión
- el problema
- el método para resolver el problema
- y la propia decisión.

En este proceso, la persona puede ser un experto con bastante conocimiento de

la situación ó bien puede poseer nulo conocimiento, el problema puede ser específico o pobremente definido con visión mono objetivo (en vez de multi objetivo). De igual manera el método puede ser heurístico o determinístico e implementado con o sin ayuda computacional (Lane, *et al* 1994).

Las técnicas de planeación multi objetivo para la toma de decisiones analizan el entorno productivo considerando agua, suelo, planta, clima y las acciones del hombre, aspectos que deben ser considerados necesariamente en el manejo integrado del agua a nivel y escala que se trate.

En el manejo integral de los recursos naturales, es necesario reconocer tanto las características del ciclo hidrológico y su interacción con otros recursos naturales y los ecosistemas, partiendo del punto central de que el agua es un recurso finito y que su uso sustentable no puede lograrse si se analizan y se administran por separado las demandas de los diferentes usos, incluyendo el ambiental, o si estas demandas no se contrastan en su conjunto con la oferta limitada del liquido (Nouvelot, 1997; Sánchez, 1995).

Jasso R. (1999) establece que la teoría de manejo integral propone diagnóstico, aplicación de tecnología y monitoreo del efecto de la aplicación de la tecnología sobre la condición del ecosistema. Es decir, se trata de un ciclo recurrente entre monitoreo, diagnóstico y tecnología. Estos aspectos deben ser considerados en los proyectos de desarrollo y científicos en el contexto del manejo integrado de cuencas e hidrológica. Un paso preliminar lo constituye el diagnóstico de las diversas eco regiones desde un punto de vista físico y socio económico para determinar la mejor estrategia de desarrollo tecnológico que permita el crecimiento económico, la integración de la sociedad y la conservación de la biodiversidad.

10.2 Los Sistemas de Auxilio en la Toma de Decisiones

Una de las herramientas para identificar prácticas de manejo para la conservación de los recursos naturales, son los Sistemas de Auxilio en la Toma de Decisiones (DSS por sus siglas en ingles), también llamados Sistemas Multi Objetivo para la Toma de Decisiones (MODSS).

El significado y utilidad de los DSS depende del objetivo y los usuarios; así, existen dos categorías generales de los DSS:

- Apreciación cualitativa (principalmente fundamentada en formatos en papel) de los efectos de las prácticas de manejo sobre la permanencia de los recursos naturales y
- Sistemas basados en programas computacionales que combinan bases de datos, modelos de simulación, teoría de decisión multi objetivo y una interfase gráfica con el usuario.

Estos últimos sistemas tienen la capacidad de trabajar con información proveniente de modelos de simulación, datos medidos y opinión de expertos. Así, los modelos de simulación que se utilicen para parametrizar variables de decisión deberán tener la capacidad de cuantificar las variables de interés.

Sin embargo, acorde a Lawrence (1996), la complejidad de los modelos de simulación (medida esta en función del número de variables que involucra) y la disponibilidad de datos, son aspectos que se deben considerar al parametrizar variables de decisión. Este investigador asienta que estos factores afectan la eficiencia de los DSS; para cuantificar este efecto, propone el algoritmo que señala la figura 10.1. En éste método, el efecto de cada sistema de manejo en cada variable de decisión es cuantificado usando tres fuentes de información:

- Mediciones de campo
- Opinión de expertos y
- Modelos de simulación

Toda vez que las variables de decisión han sido cuantificadas, los resultados del DSS se ordenan usando tres métodos:

- El promedio del mejor y peor escore
- La distancia euclidiana a la alternativa ideal
- Una modificación de la anterior

Cada método de ordenamiento (ranqueo), se utiliza para identificar el sistema de manejo preferido con cada fuente de información y comparado entre las fuentes de información.

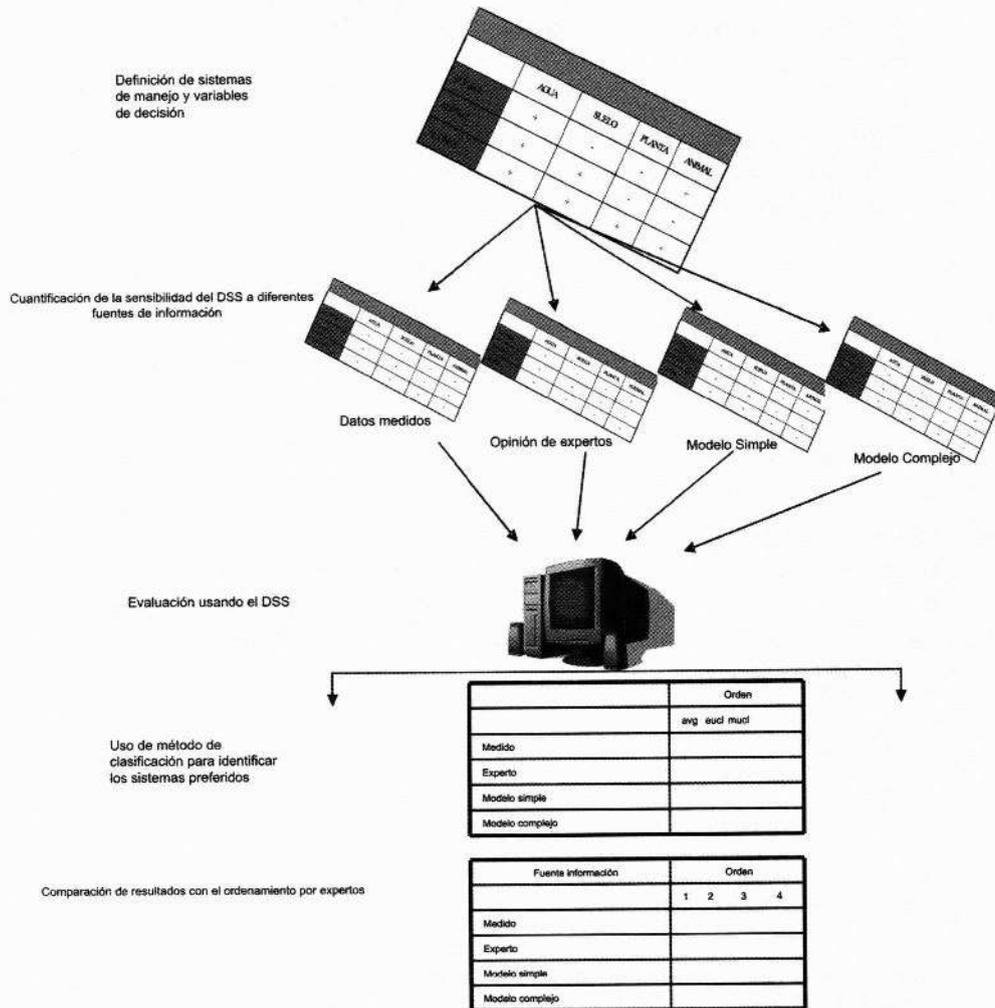


Figura 10.1: Representación esquemática de la aproximación para cuantificar el efecto de la fuente de información y la complejidad de los modelos de simulación en la eficiencia del DSS (Modificado de Lawrence, 1996).

Dentro de las categorías antes anotadas, la literatura menciona un gran número de sistemas de auxilio en la toma de decisiones; por ejemplo, Power (2003) establece que los trabajos iniciales en este contexto fueron diseñados para automatizar la generación de reportes mediante computadora. Otros trabajos pioneros fueron los de Keen y Morton (1978) y Bonczek et al. (1981). Por otro lado, Holsapple y Whinston (2001) y Turban y

Aronson (2000) presentan una buena revisión del estado actual de los DSS y analizan algunos conceptos. Bonczek (1976), fue uno de los pioneros en el uso de un DSS en aspectos relativos al manejo de los recursos naturales.

En tratándose del manejo de recursos naturales, Lawrence *et al.* 2001 y Lawrence *et al.* 2002, mencionan el uso de un DSS, que ha sido desarrollado por el servicio de investigación en la agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica y cuya interfase amigable con el usuario ha sido desarrollada por el Departamento de Recursos Naturales de Queensland, Australia. El inicio de este esfuerzo es el desarrollo del Sistema de Auxilio Multi Objetivo para la Toma de Decisiones (MODSS por sus siglas en inglés) el cual considera bases de datos, modelo de optimización en hidrología, erosión, químicos, nutrición, economía y un modelo de decisión como herramienta, (Lane *et al.* 1991).

El software del MODSS apoya la toma de decisiones individuales o grupales y utiliza alternativas de decisión, una jerarquización de los rangos de los criterios de decisión, funciones score y programación lineal para identificar las mejores alternativas de decisión para el manejo de un problema determinado. A la tabla que se genera con los criterios, alternativas y scores se le denomina matriz y se caracteriza por ser genérica y abierta para motivar la participación de tomadores de decisiones y puede aceptar información de hechos reales, resultados de modelos de simulación y la opinión de expertos en el campo de interés para soportar la toma de decisiones.

Una vez llena la matriz se procede a evaluar las alternativas con los criterios correspondientes, pudiendo ver los resultados en un formato de barras horizontales para mostrar las mejores y peores alternativas de los scores. La longitud de las barras representa la sensibilidad de cada alternativa para cada uno de los criterios.

La importancia de los modelos radica, entre otros aspectos, en la simulación y predicción de los fenómenos físicos, a corto, mediano y largo plazo. Así mismo, a través de los modelos se pueden obtener relaciones de causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales (Oropeza, 1999). Los modelos de simulación en las áreas referidas han sido derivados de los modelos CREAMS (Químicos, Escurrimientos y Erosión de sistemas de manejo agrícolas, por sus siglas en inglés) (Knisel, 1980) y EPIC (modelo para calcular el impacto de la erosión en la productividad, por sus siglas en inglés) (Williams *et al.*, 1983). El modelo de decisión basado en la toma de decisión multiobjetivo permite conciliar conflictos de intereses, ya que un plan de manejo de recursos naturales puede reforzar un subproceso de interés, pero puede a su vez afectar otros procesos adversamente (Leonard *et al.*, 1987).

El problema de conciliar intereses en el manejo de recursos naturales es complejo y con interacciones difíciles de cuantificar. Los usuarios de las cuencas hidrológicas manifiestan múltiples objetivos con el consecuente impacto en el corto plazo. La teoría de de decisión multi objetivo viene a solventar parcialmente la situación al considerar todos los intereses, opciones e impactos de posibles acciones (Heilman, *et al.* 2003).

El DSS Facilitator

El Sistema Soporte de Decisiones descrito en el presente capítulo, denominado también “Facilitador”, es un software que apoya la toma de decisiones individuales o grupales con la utilización de alternativas de decisión, una jerarquización de los rangos de los criterios de decisión, funciones de score y programación lineal para identificar las mejores alternativas de decisión para el manejo de un problema determinado. Se puede asentar, sin pérdida de generalidad, que la gran mayoría de DSS existentes contemplan los mismos componentes adecuados a la rama de la ciencia que se trate.

La estructura numérica del Facilitator, se fundamenta en el trabajo de Yakowitz *et al* (1993) partiendo del siguiente raciocinio: suponiendo que existen n criterios que el tomador de decisiones (i.e productores, técnicos, jefes de distrito, comités hidráulicos) han jerarquizado en un determinado orden de importancia. Si V_j es el score de la alternativa j evaluada con respecto al criterio i en el orden de importancia, y w_i es un factor de peso asociado con el criterio i , entonces el score mas alto (ó bajo) y el mejor (ó peor) para la alternativa j en congruencia con el orden de importancia, se encuentra resolviendo el siguiente problema lineal descrito para los pesos w_i :

$$\begin{aligned} \max(\min) V_j &= \sum_{i=1}^n w_i v_{ij} \\ \text{sujeto a } \sum_{i=1}^n w_i &= 1 \\ w_1 \geq w_2 \dots \geq w_n &\geq 0 \end{aligned} \tag{10.1}$$

De la ecuación 10.1 para ambos casos minimizar ó maximizar, la primera restricción normaliza la suma de los pesos a 1; de igual manera, la segunda restricción hace que la solución sea consistente con el orden de importancia y fuerza a que los pesos sean positivos. La solución de los dos problemas arroja el rango completo de posibles escores dado el orden de importancia. Así, cualquier vector de pesos consistente con el orden de importancia producirá un escore que se ubica entre el mejor y peor escore. La Figura 10.2 muestra un ejemplo de cómo procede el algoritmo.

Yakowitz *et al* (1993), también mostraron que el peor y mejor escore puede ser obtenido en forma cerrada resolviendo los siguientes k problemas, empezando con el criterio de mas alto rango añadiendo criterios hasta que todos sean considerados:

$$v_{kj} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n v_{ij} \quad 10.2$$

Así, el mejor y peor escore para la alternativa j seleccionada de los resultados será:

$$\begin{aligned} \text{Mejor} = MV_j &= \max_k \{v_{kj}\} \\ \text{Peor} = PV_j &= \min_k \{v_{kj}\} \end{aligned} \quad 10.3$$

En un estudio posterior, Yakowitz y Weltz (1998) mejoraron el algoritmo básico descrito anteriormente al permitir agrupar sub objetivos bajo categorías más amplias. Este agrupamiento permite introducir posteriormente otros objetivos bajo el criterio que corresponda.

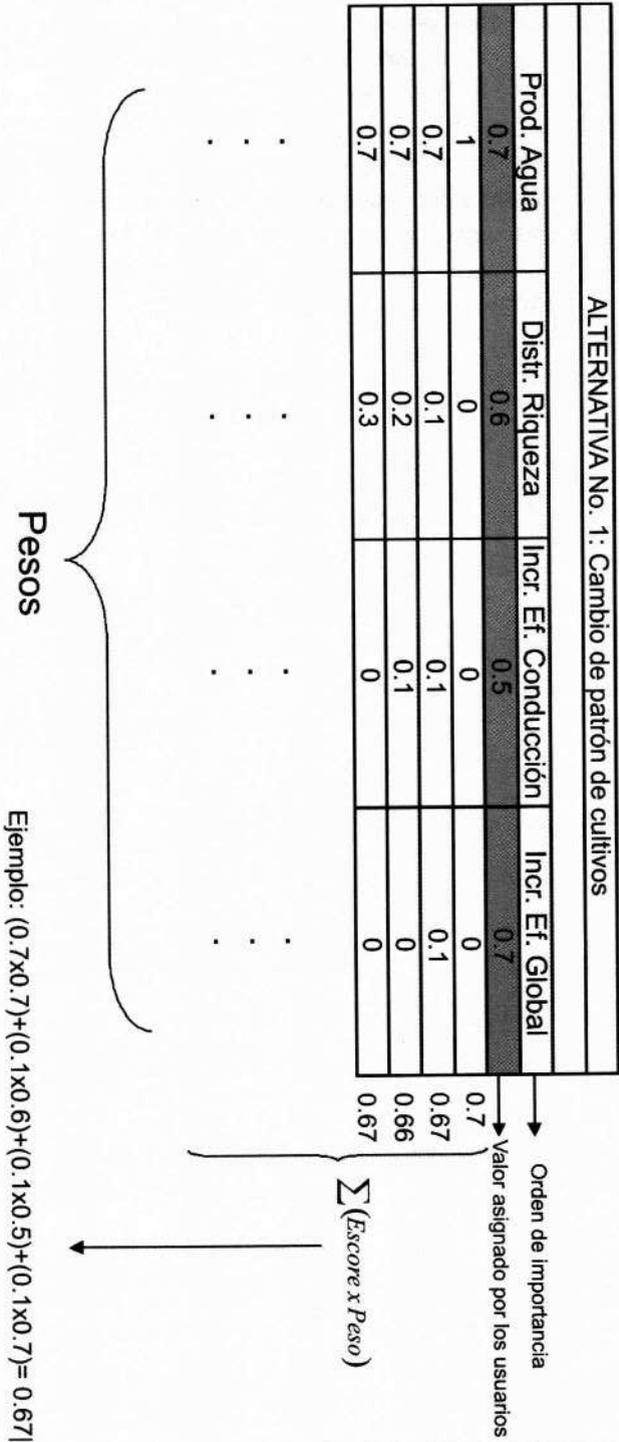


Figura 10.2: Ejemplo del planteamiento del problema lineal.

Identificación del problema.

El punto central de este proceso es la identificación del problema acerca del cual se tomará una decisión por lo que es necesario proponer y evaluar alternativas de solución bajo criterios de calidad.

Consulta de expertos.

Definido el problema, es necesario consultar a personas especialistas en el tema, a los cuales el algoritmo denomina expertos. La manera deseable de identificar a los expertos es reunir a las personas involucradas en el problema, especialistas en el tema y en general a quienes muestren interés en conformar un Grupo de Planeación y Coordinación (GPC) para el adecuado enfoque del problema y líneas de acción (Macías, 2005).

Generación de alternativas de solución o cursos de acción.

Para el adecuado curso en la toma de decisiones es necesario plantear varias alternativas o cursos de acción por los participantes con la finalidad de estar en posición de seleccionar la mejor. Una vez que se haya generado una lista de posibilidades, se procede a documentar cada alternativa con la finalidad de ayudar a aquellas personas que no están involucradas en las discusiones para saber como fueron generadas las mismas.

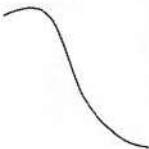
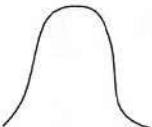
Identificación de criterios de evaluación y evaluación de alternativas

Los criterios se refieren a la manera de evaluar las alternativas. En esta etapa se evalúan las alternativas generadas con los criterios previamente definidos. En el DSS o Facilitador, se conforma una tabla con los criterios arriba y a lo largo del encabezado y las alternativas se enlistan en el lado izquierdo. Este software, provee de cuatro funciones para representar el impacto de la alternativa en el objetivo (Cuadro 10.1). Esta metodología permite eliminar las unidades de las variables (normalizar) para que estas

puedan ser comparadas entre sí. Normalmente para parametrizar variables de decisión se utilizan modelos de simulación.

En el caso de utilizar funciones escore distintas a la lineal, cuando se corren las evaluaciones, éstas se convierten en escore en el cuerpo de la misma tabla. Si se cuenta con suficiente información se podría contar hasta con 10 escores para el mismo número de alternativas. Si es poca la información disponible, mínimo se deberá contar con 3 escores para que por lo menos se considere cual es buena, media o mala. Se aconseja evaluar criterio por criterio. El valor más alto del escore corresponde a la mejor alternativa y el mas bajo a la menos conveniente (Figura 10.3). Esto se ejercita con todos los criterios para establecerles sus escores correspondientes. Es conveniente tener una visión rápida del escore para poder detectar si se han considerado los principales factores del problema central, con ello se detectará que información adicional se puede requerir para tener más confianza en las respuestas de evaluación.

Cuadro 10.1: Descripción de funciones para calificar impacto.

Función de escore	Representación de la variable	Observaciones
MAS ES PEOR		Normalmente es usada para representar fenómenos de deterioro como contaminación, erosión, etc.
MAS ES MEJOR		Función utilizada para representar incrementos benéficos como rendimiento, ingreso, bienestar, etc.
RANGO DESEABLE		Cuando la variable de interés esta acotada por un mínimo y un máximo como rangos permisibles de contaminación, desechos, etc.
RANGO NO DESEABLE		Cuando la variable de interés esta acotada por un mínimo y un máximo como rangos no permisibles.
MAS ES MEJOR LINEAL		Función usada cuando existe la opinión del experto

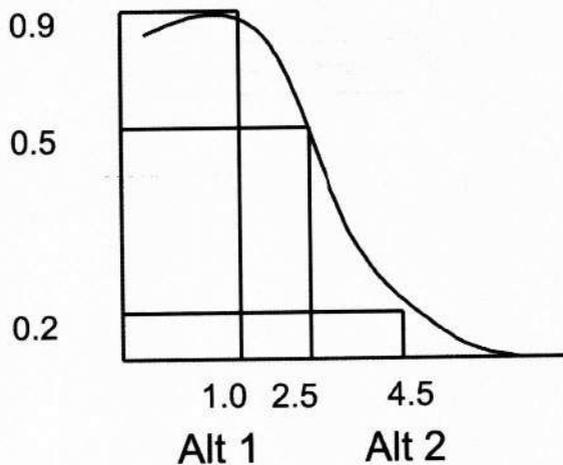


Figura 10.3: Ejemplo del proceso de evaluación de alternativas.

El software Facilitator es dominio público y se puede obtener de la siguiente URL:
<http://facilitator.sourceforge.net/>.

En el anexo IV aparece el manual de operación en español del DSS Facilitator.

Capítulo XI

¿Hacia Una Cultura del Agua?

Ha quedado expuesto en capítulos anteriores que los problemas actuales relacionados al recurso agua tienen fundamentalmente dos causas: las naturales y las antropogénicas. En la primera el hombre ha tenido que convivir con dos situaciones diametralmente opuestas: la lucha por el agua y la lucha contra el agua. En la segunda, las acciones ligadas a la productividad han jugado un papel preponderante en la variabilidad en la disponibilidad del recurso. Sin embargo, se ha demostrado que las dos causas no se encuentran aisladas y son interdependientes. Por ejemplo, en el capítulo I se asentó la importancia de la composición de los gases en la atmósfera y el impacto que su cuantía ejerce sobre el balance hidrológico; es decir, las causas se encuentran ubicadas en un ciclo en el que las consecuencias de uno llegan a ser las causas del otro.

La alteración del estado natural de la superficie terrestre ha sido práctica común desde los inicios del hombre primitivo en un afán de adaptar el hábitat a sus necesidades. El constante crecimiento poblacional en forma exponencial ha acelerado el proceso de deterioro en el último siglo a medida que la tecnología avanza. Los cambios notorios de alteración incluyen: desertificación de las regiones semi áridas (e. g. desnudez del suelo, alteración de la estructura edáfica), salinización, deforestación y urbanización (Nicholson, 1988). Un ejemplo de esto es que la creciente demanda de agua ha puesto tal presión en los acuíferos que en muchos países las reservas han quedado en la categoría de explotación insostenible lo que ha ocasionado el secado de algunos ríos

antes de que éstos desemboquen en los océanos. A medida que la demanda de agua para riego, uso industrial y consumo poblacional se incrementa, la competencia entre el sector rural y las ciudades se intensifica. En algunas ciudades del mundo la única manera de solventar las demandas para consumo humano es restándole agua a la agricultura, (Brown, 1996).

La modificación de la superficie terrestre cambia las propiedades físicas de la atmósfera y modifican los procesos que ocurren en su interfase. Así, Anthes (1984), menciona algunos de los efectos resultados de los cambios en la naturaleza de la cubierta terrestre:

- Albedo
- Emisión Infrarroja
- Absorción de energía solar
- Rugosidad
- Intensidad de turbulencia
- Evapotranspiración
- Retención de humedad
- Humedad relativa
- Humedad específica
- Temperatura máxima y mínima
- Nubosidad
- Precipitación
- Variación del movimiento vertical de masas de aire
- Aerosoles orgánicos
- Velocidad del viento cercano a la superficie
- Escurrimiento
- Erosión
- Cociente de Bowen
- Aerosoles inorgánicos (suelo)

Las evidencias de la situación del recurso agua en el mundo han puesto de manifiesto la necesidad de acciones integradas de las naciones industrializadas en aras de

dar permanencia a una atmósfera “sana” que evite el impacto negativo sobre la faz de la tierra. Sin embargo, los esfuerzos no han tenido el impacto deseado (no se respetan los protocolos internacionales pactados) quizá por la exigencia del mundo globalizado en relación a desarrollar mas con menos con la consecuente mecanización de toda actividad productiva y el inevitable deterioro de los recursos naturales.

Por otro lado, la pobreza extrema de algunos países en vías de desarrollo en los que, su gente no participa de las ventajas que la globalización supuestamente implica, ha forzado a sus habitantes a la segregación en donde su única fuente de alimentos y de energía lo constituyen directamente la explotación de los recursos agua y suelo; esto bajo la premisa de que un país pobre es inminentemente agrícola. Pero, es necesario puntualizar, que la pobreza y marginación no son necesariamente las únicas condicionantes para el deterioro. La agricultura empresarial que deriva en productos cotidianos en bien de la sociedad tiene una eficiencia de transformación muy baja (i. e. Cuadro 3.2 capítulo III) en donde el riego ostenta una eficiencia global máxima de 45%.

Aunque no existe aún clara evidencia observacional, los modelos de simulación predicen que los cambios en las características de la superficie alterarán los patrones atmosféricos de flujo modificando las condiciones climáticas. Especial énfasis se deberá poner en el incremento del albedo y la reducción de humedad superficial así como en la deforestación que en su conjunto conllevan a procesos de desertificación; los ecosistemas de regiones áridas son especialmente sensibles a estos cambios al impactar el microclima regional donde el agua es “reciclada” a través de la evaporación del suelo y el movimiento vertical prevalece durante patrones climáticos relativamente estacionarios.

Los procesos físicos y dinámicos a través de los cuales la superficie terrestre influencia los patrones climáticos a larga escala, incluyen: el flujo de humedad, estabilidad del aire, convergencia y divergencia de patrones de flujo, movimientos verticales dinámicamente o radiactivamente inducidos y calor latente (Nicholson, 1988)

11.1 Información, conocimiento, y cultura

Mencionar que es necesario incursionar en una *cultura del agua* es tan carente de sentido como mencionar que solo se construirá el último piso de un edificio. Es necesario culturizar de manera integral a la sociedad de tal manera que sus acciones redunden en un crecimiento sostenido sin comprometer el bienestar de las futuras generaciones.

Resulta pertinente diferenciar los vocablos “información, conocimiento y cultura”. El mundo actual es uno en el que nos mantenemos informados a través de medios eficientes de transferencia de datos; sin embargo existe una diferencia tajante entre la información, el conocimiento y la cultura. Así, como lo menciona Neira (1999): *“Algunos profetas del intelecto han declarado el fin de la era del conocimiento y el comienzo de la era de la información; esta última tiende a expulsar el conocimiento. La información consiste en meros signos y números mientras que el conocimiento posee un valor semántico. Lo que necesita el hombre para propiciar la cultura es recibir conocimiento aunque lo que recibamos sea información. Es característica de la época moderna que mucha gente no pueda distinguir la diferencia entre información y conocimiento”*. Ahora, en el mejor de los casos, la información predispone a la cultura pero no es ley. Así por ejemplo se puede encontrar a personas que han hecho cúmulo de información pero que su comportamiento dista mucho de catalogarse de culto así, también es cierto que existen en el mundo personas con poco conocimiento pero con un sentido ciudadano y patriota que lo ubican en la categoría de persona culta. La cultura, por otro lado, permite discernir con mayor capacidad intelectual el cómo debe utilizarse la información y el conocimiento para el bien común. Mediante la cultura se conservan los conocimientos del pasado y se modela el futuro; es decir, para conocer en términos de la disponibilidad de bienes de consumo derivados de los recursos naturales, que nos espera en el futuro, baste con analizar el pasado reciente. Comprometer el futuro paga un precio si consideramos que el hoy constituye el ayer de mañana.

Explicar el comportamiento de nuestra sociedad en relación a la conservación de los recursos naturales, especialmente el agua, está fuera del propósito del presente capítulo; sin embargo, es necesario comentar que a la cultura de la industrialización, que caracterizó al mundo en el pasado reciente, le precedió una cultura agraria. Actualmente, el mundo es definido por la cultura de la información, la telecomunicación y de los sistemas automatizados de producción.

En esta nueva cultura, se ha apartado al ciudadano del conocimiento para dar paso a la adquisición de herramientas de análisis: “a nuestros jóvenes se les está enseñando como analizar información de manera rápida y no en como generarla, se les inculca la comprensión de verdades pero no el como descubrirlas”; es de esperarse entonces la permanencia de una civilización carente de todo sentido de la conservación.....sabemos que vamos muy de prisa pero no sabemos hacia donde.

En este arraigo cultural, los *usos y costumbres* están presentes cuando se trata de toma de decisiones de fondo que de alguna manera persiguen el objetivo de conservar los recursos naturales deteriorados. Nuestra Constitución establece que el

agua es de la Nación (Artículo 16 de La Ley de Aguas Nacionales (CNA, 1992): *son aguas nacionales las que se enuncian en el párrafo quinto del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*) los usuarios pagan el derecho de uso y si acaso el de servicio. Sin embargo, no se paga el costo y valor del líquido.

11.2 Precio y valor del recurso agua

El *precio* del recurso agua debiera de ser función de al menos los siguientes aspectos:

- a) La variabilidad en la disponibilidad debido a factores climáticos
- b) El costo de aprovisionamiento (extracción, embalse, manejo, traslado, mantenimiento, etc.)
- c) El fin que persigue su uso: doméstico, industrial, recreación, agropecuario
- d) La eficiencia en su transformación

Un ejemplo claro del precio “justo?” del agua, ante el cual la población no hace reclamo alguno, es el agua embotellada la cual alcanza un precio exorbitante; en nuestro país en algunas regiones alcanza más de cien dólares el metro cúbico. Este precio incluye el procesamiento, embotellado traslado y entrega. Sin embargo, cuando se cobra 70 centavos de dólar el metro cúbico por servicio en el agua potable y alcantarillado, es común encontrarse con manifestaciones al respecto. Es claro que el precio debe reflejar las diferencias en la densidad de población y las necesidades del líquido, es decir, el precio debe ser diferenciado en función de estas variables.

En el corto plazo la necesidad del servicio de entrega de agua y por ende el precio también deberá ser función de la tasa de incremento poblacional y de los diferentes niveles de vida. En este último aspecto, las necesidades de un sector de la población son sustancialmente diferentes al del sector económicamente menos favorecido. Los primeros tienen ciertas necesidades (mayor higiene, servicios, recreación, etc.) que demandan de más agua.

En el caso de la agricultura, como se asentó, principal consumidor del recurso agua en el mundo con un 70% seguido de la industria con 22% y doméstico 8%, el

panorama es mas que desalentador.

Para dar precio al recurso entonces, es necesario el establecimiento de una política ecológica que fomente la gestión racional del agua y que considere un aumento en el precio de la que se usa en la agricultura y ganadería y subsidie a los productores que hagan un uso eficiente de ella.

En términos de *precio* del agua como recurso escaso, está fuertemente ligado a aspectos económicos y el *valor* está ligado a la Sustentabilidad de ecosistemas que generan bienestar y dan permanencia a los estándares de vida; este último difícil de evaluar. El costo del agua a partir de sus usos alternativos (costo de oportunidad) es de suma importancia para orientar una asignación racional fundamentada en la relación oferta y demanda. Así, en términos económicos en la agricultura de riego una manera conocer el costo de oportunidad del agua asignada a la agricultura, se puede representar de la siguiente manera: (P_{ar} [\$·m³]):

$$P_{ar} = \frac{IN_r - IN_{sr}}{V_r} \quad 11.1$$

Donde IN_r es el ingreso neto del cultivo bajo riego, IN_{sr} el ingreso neto sin riego y V_r es el volumen de riego utilizado.

Como se asentó líneas arriba, asignar un *valor* al recurso agua no es tarea fácil sin embargo, en su valoración deben de intervenir al menos los dos siguientes aspectos:

- a) La incertidumbre en la disponibilidad
- b) El impacto en la sociedad por su carencia (véase Figura 3.1 en el capítulo III)

Sin embargo, en este contexto es imprescindible considerar el término de *Sostenibilidad Económica* que tratándose de recursos naturales se convierte en *Rendimiento Económico*. La pregunta obligada aquí es: ¿Como se relacionan el desarrollo sustentable y el rendimiento económico? Como se ha dejado entrever en capítulos precedentes, el rendimiento sostenible en procesos donde interviene el recurso agua, puede ser definido como: *el flujo que puede ser tomado de las fuentes naturales permanentemente por un periodo indefinido de tiempo considerando que la fuente está en un*

estado estacionario lo que por definición implica un uso sostenible año tras año. De esta definición resulta obvio que lo contrario provoca un rendimiento no sostenible.

En términos económicos un “estado estacionario” se puede concebir en tres partes (haciendo una modificación al concepto de Hartwick y Olewiler, 1998):

- 1) Flujo de insumos
- 2) El proceso de producción
- 3) Flujo de bienes

El caso del uso sostenible del recurso agua en una cuenca hidrológica se ilustra en la Figura 11.1. La disponibilidad de productos en forma estable del sistema requiere del mantenimiento del proceso de producción y el flujo estable de insumos. Para garantizar el estado estacionario del sistema (no se degrada), es necesario proyectar el volumen de productos acorde a la disponibilidad de los insumos (agua). Esto quizá asuma que la población se mantenga relativamente constante lo cual es una falacia. Cualquier desbalance modifica los procesos afectando la sostenibilidad del sistema.

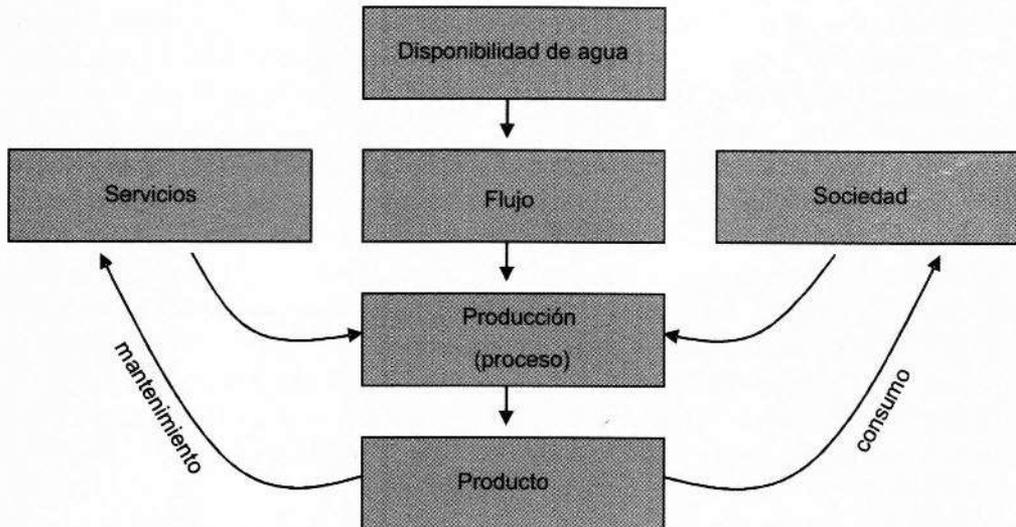


Figura 11.1: Economía del agua en estado estable: la demanda por la sociedad de consumo no crece abruptamente y la disponibilidad de agua permanece estable.

Es pertinente mencionar que el principal enemigo del estado estacionario de los ecosistemas en donde el agua juega un papel preponderante, es el desarrollo tecnológico. Por ejemplo se han documentado diversas causas de este desbalance (Descroix, *et. al*, 2004) adquiriendo relevancia el flujo poblacional que se ha relacionado inversamente con el deterioro del bosque en la Sierra Madre Occidental; es decir, a menor población en las partes altas mayor deterioro. Esto causado porque los emigrantes envían recursos a los que permanecieron en su sistema y éstos han adquirido más y mejores herramientas de “trabajo” con fuertes impactos en los procesos de deterioro. Por otro lado, ante la incertidumbre de la precipitación pluvial, los habitantes de las partes altas de las cuencas han iniciado procesos de construcción de obras de retención de cauces impidiendo así la interconexión con los ríos que van a dar a los grandes embalses de los que depende la agricultura de riego aguas abajo de los sistemas. Luego entonces, el valor que se le asigna al agua depende de quien intervenga en el proceso de valoración.

11.3 La Hidopolítica como mecanismo de gestión

Este término hace referencia a la gestión tendiente a conciliar los problemas de rivalidad por el acceso y disposición de las reservas de agua en las cuencas hidrológicas sobretodo en aquellas en las que diferentes entidades federativas comparten los mismos recursos naturales. Desde hace tiempo en México aparecieron las rivalidades hidráulicas con la emergencia de las grandes obras de ingeniería tendientes al desvío y retención de las aguas superficiales para uso local o generación de energía para venta inclusive a otros países (algunos ejemplos de estados en conflicto: Tamaulipas y Nuevo León, Sonora y Sinaloa, Coahuila, Zacatecas y Durango, Sinaloa y Durango, además de las cuencas transfronterizas del norte que comparten las aguas del río Bravo. Independientemente del beneficio social que se adjudique a las obras de captación (embalses), el hecho de detener el cause de un río, sea para protección civil o para controlar los flujos, implica que se modifique el ecosistema que depende de la humedad que propicia la rivera del río a la vez el ecosistema aguas abajo de la obra de captación prescinde del vital liquido. La decisión en este sentido es multi objetivo, es decir, existirán intereses contrapuestos que tienen que ser conciliados por los potenciales usuarios, afectados, federación, etc. El balance del “antes y después” es un buen indicador del impacto potencial. En este caso, la herramienta de simulación de procesos hidrológicos asiste como un mecanismo de decisión invaluable.

Para entender la perspectiva de los conflictos relacionados con el agua entre entidades federativas (estados en México), se tiene que considerar su configuración geo-

gráfica así como la localización y origen de sus recursos hídricos. En tal sentido, en América Latina, existe la Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en el Manejo de Cuencas Hidrológicas que en su paradigma contempla un consenso en cuanto al uso y manejo de los recursos naturales en las cuencas hidrológicas. También, en colaboración con la FAO, existe una red Latinoamericana de Cooperación Técnica en el Manejo de Cuencas Hidrológicas (REDLACH) que ha realizado varias reuniones a nivel internacional en las que se ha evaluado la situación de las cuencas en cada país, se han expuesto los lineamientos, los pasos a seguir y las lecciones aprendidas derivadas de diversas situaciones (Lacoste, 2003).

También la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID), fomenta la participación en foros internacionales a las naciones con conflictos potenciales relacionados al recurso agua. Este organismo organizó en el 2004 la conferencia “El Agua como Catalizador de la Paz. El objetivo de esta conferencia se centró en la resolución de conflictos en la gestión de aguas transfronterizas.

Por otro lado, la Comisión Mundial de Presas (CMP) fue fundada en 1988 por el Banco Mundial y la Unión Mundial para la Naturaleza (UMN) a fin de estudiar los efectos a largo plazo de las presas sobre el desarrollo. En este contexto, las grandes obras hidráulicas se encuentran bajo fuertes cuestionamientos indicando que las personas que obtienen menos provecho de este “desarrollo” son las que se ubican en el nivel mas bajo de la escala social (Coles, 2004). Esta comisión se ha planteado dos grandes interrogantes: ¿Como pesan los conocimientos, los intereses y los valores en la decisión de construir una presa? y ¿Cómo decidir en un contexto de intereses contrapuestos?. Es posible que las necesidades de la industria se contrapongan a aquellos de la agricultura, las de las poblaciones rurales a las de los habitantes de las ciudades o que la pugna surja entre la industria de las presas y los partidarios de las soluciones más tradicionales.

También el aumento en la población ha impulsado estas rivalidades al incrementarse la demanda y calidad de vida de los habitantes; caso grave el de la ciudad de México para cuyos habitantes se importa agua de cuencas aledañas.

11.4 El mercado virtual de agua

El mercado virtual del agua es un proceso que se ha dado desde épocas remotas aunque quizá no con el objetivo actual: *la obtención de bienes de consumo aprovechan-*

do los recursos naturales de las regiones más favorecidas con este recurso. Este mercado se refiere al proceso de importación (insumos) y exportación (productos) aprovechando las ventajas comparativas de las regiones en cuanto a la disponibilidad de agua: Por ejemplo, gran parte de las prendas de vestir en los Estados Unidos de Norte América, son maquilados en otros países; en un principio el argumento económico fue la disponibilidad de mano de obra barata. Actualmente y con mayor énfasis en el futuro cercano, será por la carencia (o protección) de suficientes reservas hídricas para la producción de los insumos y su procesamiento. Actualmente, los Estados Unidos de Norteamérica utilizan el 34% de sus reservas en agricultura y el 48% en la generación de energía eléctrica. Por cierto, la generación de energía en los Estados Unidos es una de las principales emisoras de contaminantes hacia la atmósfera con impactos en el cambio global climático; al mes de febrero del 2005 (mes en que entró en vigor el Protocolo de Kyoto a nivel mundial) esta potencia económica, junto con otras, se negó a la confirmación de su participación en ese protocolo.

Idealmente, el mercado virtual del agua debiera iniciarse cuando los procesos productivos sobrepasan el *límite ecológico* de las regiones; en ese caso, se da el proceso de importar los insumos necesarios para la conformación de productos e inclusive, de otros insumos. (Figura 11.2)

En la parte superior de la Figura 11.2 aparecen las variables de decisión que en uso práctico se refieren a la eficiencia de transformación ó productividad del agua en su más común sentido.

Racionalmente, el balance preliminar a la decisión de la importación de insumos para la producción de bienes de consumo, se inicia con el balance entre entradas y salidas del sistema productivo. Por ejemplo: para la producción de una tortilla se requieren de aproximadamente 38.7 litros de agua. Los cálculos para llegar a este valor son como sigue:

- Producción promedio por hectárea de maíz para grano: 8000 kg
- Lámina de riego requerida: 70 cm
- Eficiencia de aplicación del agua de riego: 45%
- Lámina de riego total considerando eficiencia: 155 cm = 15,500,000 lt
- Un kilo de tortilla = 50 tortillas

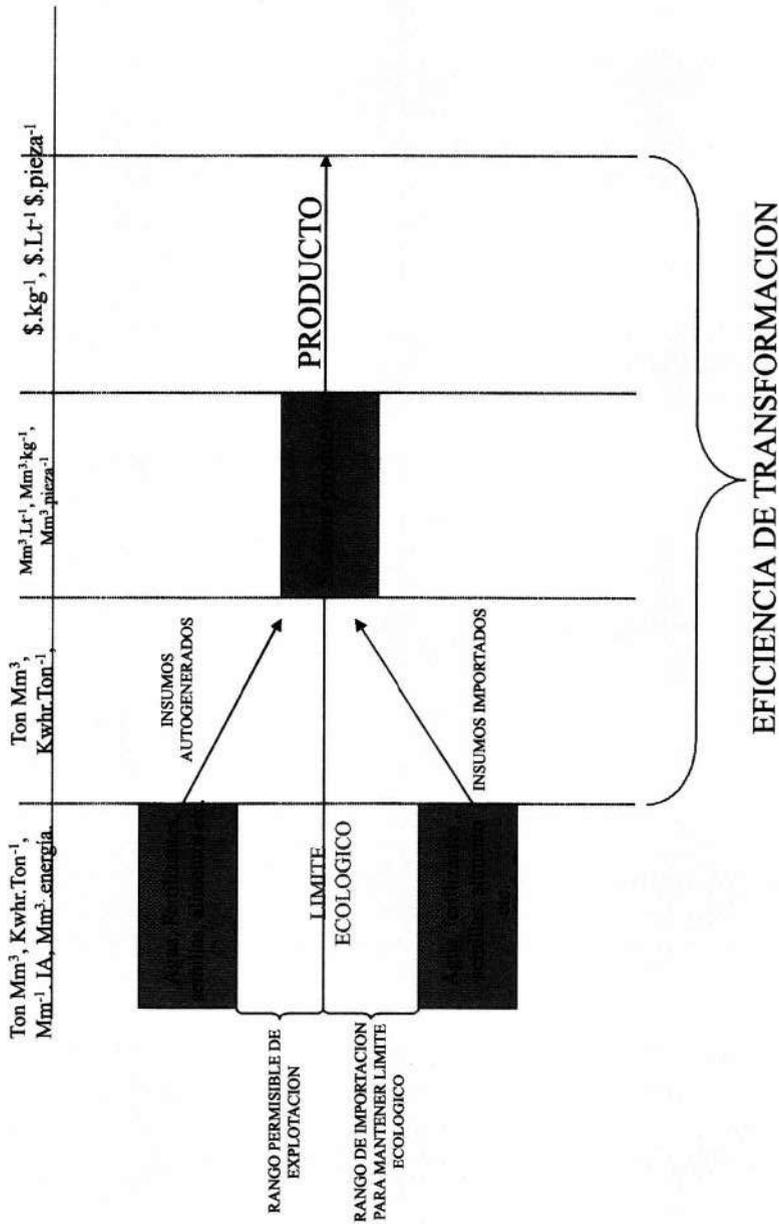


Figura 11.2: El concepto de Límite Ecológico y variables de decisión. (Sánchez, 2003).

- Por lo tanto producir 8000 kg de maíz requieren de 15,500,000 lt
- La producción entonces de un kg de tortilla requiere de 1937.5 lt
- Por lo que una tortilla requiere de 38.75 lt

Los anteriores cálculos no consideran la cantidad adicional de agua del proceso de nixtamalización, mantenimiento, etc. Nótese también la importancia que tiene la eficiencia de aplicación del agua de riego en el proceso de transformación agua – producto.

El Cuadro 11.1 muestra también los consumos básicos promedio de una familia de clase media en actividades del hogar.

Cuadro 11.1: Consumos de agua promedio en un hogar de clase media

Actividad	Gasto (tasa de uso)	Tasa de Flujo	Número de personas	Total (litros)
Excusado	4 descargas por persona por día	6 litros por descarga	4	96
Baño (regadera)	5 minutos por persona por día	9.5 litros por minuto	4	190
Lavadora	0.3 cargas por persona por día	150 litros por carga	4	180
Llaves en general	-	-	-	35
TOTAL ANUAL				182,865

De acuerdo a la anterior tabla en México cada persona consume 125 litros diarios de agua, en los Estados Unidos de Norte América, el consumo promedio es 340 litros diarios por persona; de aquí la aseveración de que el consumo está correlacionado al estándar de vida.

El Cuadro 11.1 no incluye el uso en jardinería, uso de tina de baño y usos extras como aire acondicionado (aire lavado), lavado de automóviles y actividades extraordinarias. Por ejemplo, en países desarrollados el uso del agua en los hogares se divide como sigue: (En México, esto aplica en ciertos estratos sociales)

- Jardinería: 60%
- Baño: 25%

- Cocina 6%
- Lavandería 7%

El consumo esta también ligado a la disponibilidad siendo las zonas áridas las que más demandan del insumo. Aquí, es pertinente mencionar la paradoja del agua en México ya que las regiones Norte Centro y Noroeste (véase capítulo II) tienen solo el 32% de la disponibilidad nacional de agua con el 77% de la población y producen el 85% del producto interno bruto; en contraposición, el sureste cuenta con el 68% de la disponibilidad total de las reservas de agua con el 23% de la población y produce solamente el 15% del producto interno bruto. Otro dato importante relativo a la concentración de población y la disponibilidad de agua es que la región administrativa con menos disponibilidad de agua por habitante es la Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala la cual cuenta con solo 182 m³ por habitante por año en contraste con la región Frontera sur que cuenta con 10,604 m³ por habitante para el mismo periodo de tiempo.

Al igual que el concepto de *huella ecológica* (Wackernagel y Rees, 1996), el concepto de límite ecológico sirve como herramienta para planear sustentablemente. No solo se avoca a la preocupación del deterioro ecológico e inequidad en la disponibilidad del recurso agua, sino que trata de conjuntar estos factores al proceso de toma de decisiones.

La huella ecológica de una ciudad (ejemplo del concepto de huella ecológica citado líneas arriba) es el área total que tendría que ser aislada en una cápsula para mantener los patrones de consumo de sus habitantes. Este modelo ilustra una importante realidad: como resultado de las altas densidades de población, el rápido incremento en el consumo de energía y materiales y la creciente dependencia del mercado virtual, se puede asentar que la ubicación geográfica de las ciudades ya no coinciden con la capacidad de su ecosistema para mantenerlas. Por esto, las importaciones regionales de insumos serán, en el futuro cercano, imprescindibles para mantener el límite ecológico.

El planeta tierra es un mundo con infinidad de problemas pero también se puede convivir de manera gratificante; sin embargo si se destruye por nuestras acciones más allá de su límite de recuperación, la lucha por la sobre vivencia será tal que no habrá distinción de valores ni censura de acciones, en el largo plazo, será un mundo en el que los seres vivos tendrán que mutar asumiendo como ciertos, los postulados de Darwin (la ley del más fuerte) para adaptarse a las nuevas condiciones que impondrá el deterioro.

El mundo necesita ahora invertir en el futuro; como lo declara Bertrand Russell (1980): *cuando hayamos creado una juventud libre de miedos e inhibiciones y de instintos de lucha y rebeldía, podremos abrirle el mundo del conocimiento libre y totalmente y si la instrucción que les demos resulta la adecuada, será mas bien una alegría que un trabajo para quienes la reciban.* Una generación de hombres y mujeres concientes preparados para valorar los recursos de los cuales vivimos, se engendra en las escuelas y se motiva en los hogares; acciones por valor y no por costo es lo que se requiere par preservar el vital líquido del que depende todo ser vivo sobre la faz de la tierra.

En México se necesita un plan de largo plazo para la conservación y uso de los recursos naturales; este plan deberá tener la característica de ser un proyecto de *Estado* no de *Gobierno* en donde el interés de la Nación se sobreponga al interés político, De igual manera, en nuestro país se necesita un proyecto agresivo de educación: *invertir en educación va mas allá de la construcción de escuelas y del mantenimiento de sus aulas, invertir en educación es, en primera instancia, educar a quienes educan, garantizar un pago digno a quienes optan por esa vocación (mas que carrera), es necesario crear un gradiente de talento hacia la docencia, hacer atractivo a la juventud la vocación de maestro, se necesita vincular (y hacer dependiente) al conocimiento y la cultura.*

Anexo I

Consideraciones Generales en el Manejo del Agua

En términos de evaluar sistemas de manejo del agua a pequeña escala ya existentes o de diseñar nuevos, es necesario contar con los principios básicos de hidrología y de las relaciones agua suelo planta atmósfera.

La hidrología involucra el estudio del movimiento, distribución y almacenamiento del agua. Desde una perspectiva global, tres sistemas determinan o caracterizan este movimiento: a) el sistema atmosférico, b) el sistema suelo y c) el sistema oceánico. El dominio de la hidrología se confina al sistema suelo pero puede incluir aquellos aspectos del sistema atmosférico y oceánico que afectan directamente al movimiento de humedad en el sistema suelo.

Evidentemente la precipitación, el escurrimiento y la evaporación son los principales procesos que mueven humedad de un sistema a otro. El ciclo del movimiento de humedad es cerrado desde un punto de vista global, pero se considera un sistema abierto desde el punto de vista local en el que es difícil, en términos prácticos, el establecer fronteras que delimiten las entradas y salidas al sistema local considerado. Concerniente al sistema suelo, se pueden distinguir a su vez tres sistemas: a) El sistema superficial, b) el sistema sub superficial y c) el sistema acuífero. La Figura 1 muestra que en el sistema suelo, la precipitación, escurrimiento superficial, la infiltración y la evapotranspiración son los procesos dominantes que genera y abstraen humedad y son

a los que se aboca el tratado de la presente publicación.



Figura 1: Movimiento de humedad en el sistema suelo

La mayoría de los problemas hidrológicos se relacionan con la cantidad o la calidad del agua. Acorde a Singh (1994), estos problemas pueden ser tratados en tres dominios:

- 1) El tiempo
- 2) El espacio
- 3) La frecuencia

Estos tres dominios juegan el papel crucial en la selección del procedimiento a usar para el tratado de los diversos problemas y para la construcción de modelos de simulación de los procesos que involucra el balance hidrológico.

El tiempo como dominio: Los principales problemas considerando el tiempo como dominio son dos: a) La reconstrucción del pasado (predicción) y b) la construcción del futuro (pronóstico). Dependiendo de los requerimientos de una aplicación en particular estos problemas pueden ser modelados a diferentes escalas: a) tiempo continuo, b) pequeña escala de tiempo (horaria o menor), c) diaria, d) semanal, e) mensual, f) estacional, g) anual y h) grande escala (cada 5 años, 10, o mas).

El espacio como dominio: El principal problema teniendo al espacio como dominio es la variabilidad espacial, su muestreo, regionalización, efecto en cambios de uso del suelo y contaminación. Estos problemas pueden ser modelados a diferentes escalas: a) canales, b) parcelas, c) cuencas hidrológicas, d) Continente, e) global.

La frecuencia como dominio: El principal problema teniendo a la frecuencia como dominio es determinar la frecuencia de condiciones extremas en el balance hidrológico (sea máximo o mínimo).

Los Cuadros 1, 2 y 3 señalan los problemas de los diferentes dominios.

I Principios relacionados al manejo del agua a pequeña escala

Ecuación general del balance del agua: La ecuación general del balance de agua es el elemento fundamental del análisis hidrológico y permite cuantificar las cantidades de agua en un sistema durante un periodo de tiempo determinado. Comúnmente el ciclo hidrológico se refiere al ciclo del agua desde el océano donde evapora, hasta suelo firme para posteriormente regresar de nuevo a su origen. Este movimiento incluye todos los procesos conectados con el almacenamiento y movimiento del agua en sus tres estados (Hewlett, 1982). Su importancia radica en que todos los ciclos geoquímicos (que explican la vida sobre la faz de la tierra) dependen del ciclo del agua.

Cuadro 1: Ejemplo de problemas a diferentes escalas de tiempo

Escala	Problema
Tiempo corto o continuo	<ul style="list-style-type: none"> a. Tránsito de avenidas en canales o almacenamientos b. Determinación del escurrimiento como respuesta a un evento lluvioso c. Infiltración durante un evento de lluvia d. Transporte de contaminantes
Diaria	<ul style="list-style-type: none"> a. Balance de agua b. Predicción de avenidas c. Predicción de precipitación d. Operación de vasos de almacenamiento e. Evaporación y transpiración
Semanal	<ul style="list-style-type: none"> a. Balance de agua b. Evaporación c. Operación de canales d. Pronóstico del clima
Mensual	<ul style="list-style-type: none"> a. Balance de agua b. Evaporación c. Sedimentación en embalses d. Efecto del cambio del uso del suelo
Estacional	<ul style="list-style-type: none"> a. Balance de agua b. Pronóstico del clima c. Rendimiento de cultivos d. Contaminación e. Calendarización del riego f. Efecto de sequías
Anual	<ul style="list-style-type: none"> a. Balance de agua b. Evaporación c. Avenidas máximas d. Deposición de sedimentos e. Efectos del cambio del uso del suelo f. Modelación de sequías
Periodos mas largos	<ul style="list-style-type: none"> a. Efecto del cambio del uso del suelo b. Movimiento de agua subterránea c. Movimiento de químicos en el agua sub superficial d. Modelación de ecosistemas e. Modelación de sequías

Cuadro 2: Ejemplo de problemas a diferentes escalas de espacio

Escala	Problema
Distancia corta o continua	<ul style="list-style-type: none"> a. Intensidad de precipitación b. Rugosidad superficial c. Gradación o degradación d. Irrigación
Canales	<ul style="list-style-type: none"> a. Flujo en canales abiertos b. Tránsito de canales c. Erosión y transporte de sedimentos
Parcela	<ul style="list-style-type: none"> a. Hidrología b. Flujo superficial c. Eficiencias de riego d. Erosión e. Cambio en el uso del suelo
Cuenca hidrológica	<ul style="list-style-type: none"> a. Hidrograma unitario b. Efectos del cambio en el uso del suelo c. Balance de agua
Continente	<ul style="list-style-type: none"> a. Predicción climática b. Sequías c. Balance de agua d. Daños por avenidas e. Contaminación atmosférica y sus efectos
Global	<ul style="list-style-type: none"> a. Balance de agua b. Patrones climáticos y cambios c. Interacción atmósfera-tierra-océano d. Sequías e. Efecto de actividades humanas

Cuadro 3: Ejemplos de problemas a diferentes frecuencias.

Escala	Problema
Extremos	<ul style="list-style-type: none"> a. Lluvias extremas b. Descarga pico anual c. Descarga mínima anual d. Huracanes e. Temperaturas extremas anuales
Volúmenes	<ul style="list-style-type: none"> a. Volumen anual b. Sedimentos anuales c. Precipitación anual d. Abatimiento anual de acuíferos
Medias	<ul style="list-style-type: none"> a. Temperatura media diaria b. Flujo medio diario c. Series de tiempo d. Intensidad de precipitación media diaria

Es esencial prestar atención a la definición de las fronteras del sistema a ser analizado así como también las especificaciones de la escala de tiempo a las que se circunscribirá el estudio mediante la ecuación general del balance de agua la cual establece que el cambio en el almacenamiento (D_s) en un tiempo dado es igual a la diferencia entre las entradas (E) y salidas (S) al sistema en estudio. Esta ecuación puede ser descrita como:

$$\Delta S = E - S \quad 1$$

En términos del manejo del agua en las cuencas hidrológicas, considerando un punto de control, las entradas pueden ser la precipitación (en cualquier forma) y el escurrimiento aunque éste último puede ser también considerado como salida. Las salidas del sistema son la evaporación, la transpiración y la infiltración.

Existen diferentes métodos para la cuantificación de las variables que intervienen en el ciclo hidrológico. Como se ha dejado evidente, en términos de modelación hidrológica, los métodos físicamente basados son los de preferencia en virtud de la capacidad de representar más certeramente los procesos que definen el ciclo del agua.

La certidumbre en los cálculos utilizando la ecuación 1, son fuertemente dependientes de la exactitud y calidad de la información disponible.

La ecuación del balance de agua se puede usar a cualquier escala; así por ejemplo, su aplicación para definir las posibilidades de éxito de un sistema productivo en zonas de temporal, se presenta el siguiente ejemplo:

- Se pretende sembrar el cultivo de maíz en una zona de temporal en el norte de México cuyo requerimiento hídrico (E_t) es de 762 mm en todo su ciclo vegetativo. El lugar cuenta con una precipitación promedio anual de 318 mm (promedio de 50 años de registro). El suelo donde se desea sembrar el cultivo tiene una capacidad de retención de humedad de 200 mm. (véase características de la región en la Figura 2
- La información de capacidad de retención de humedad del suelo se obtiene mediante la Figura 3
- El ordenamiento de la información para los cálculos se muestra en el Cuadro 4

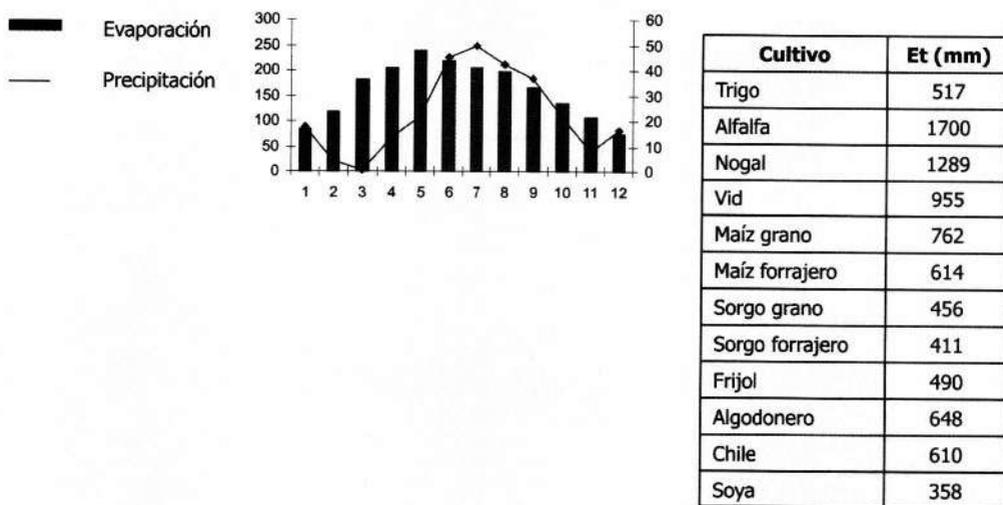


Figura 2: Requerimientos de agua de algunos cultivos en la región versus relación Precipitación – evaporación. (Sánchez, 2004)

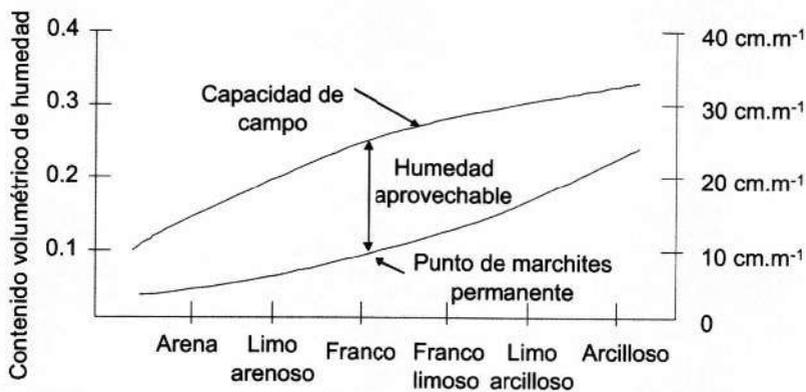


Figura 3: Capacidad de retención de humedad para diferentes tipos de suelo (Adaptado de Skogerboe, 1981 y Schults, 1995)

Cuadro 4: Ordenamiento de la información para los cálculos del balance de agua.

MES	Et	Pp	Δs 1	EV	Balance 2
Enero	0.0	25.14	160.0	0.0	
Febrero	0.0	31.75	191.75	0.0	- 8.25
Marzo	0.0	24.89	200.00	0.0	+ 16.64
Abril	0.0	16.51	196.51	20.00	- 3.49
Mayo	0.0	8.12	164.63	40.00	- 35.37
Junio	0.0	8.89	93.52	80.00	- 106.48
Julio	125.63	42.41	10.3	0.0	- 189.7
Agosto	333.24	53.59	- 269.35	0.0	- 469.35
Septiembre	223.52	35.30	- 457.57	0.0	- 657.57
Octubre	79.5	20.32	- 516.75	0.0	- 716.75
Noviembre	0.0	18.03	- 498.72	0.0	- 698.72
Diciembre	0.0	33.27	- 465.45	0.0	- 665.45
•	762.0	318.22			

¹ El cambio en la humedad actual del suelo (Δs_i) se obtiene rescribiendo la ecuación 1 como:

$$\Delta s_i = (\Delta s_{i-1} + Pp_i) - (Et + Ev) \quad 2$$

El primer término del lado derecho de la igualdad de la anterior ecuación son consideradas las entradas al sistema y el segundo las salidas.

² El balance se obtiene como déficit (-) ó exceso (+) al restar 200 mm (capacidad de retención de humedad del suelo) al contenido actual de humedad del suelo (Δs_i); en esta ecuación Δs_{i-1} es el contenido de humedad anterior.

II Conceptos básicos de hidráulica: El proceso de entrega de agua a sitios diferentes de donde es almacenada, involucra principios básicos de hidráulica que de no observarse se corre el riesgo de dañar la obra de captación o de mermar la disponibili-

dad del recurso por concepto de pérdidas.

El agua se mueve en canales o tuberías en respuesta a fuerzas que se desarrollan por concepto de diferencias en presiones, recalcando que la presión es una forma de energía. Así, las Figuras 4 y 5 muestran las relaciones de energía en un segmento de longitud L , entre dos secciones 1 y 2 en un canal abierto o tubo respectivamente.

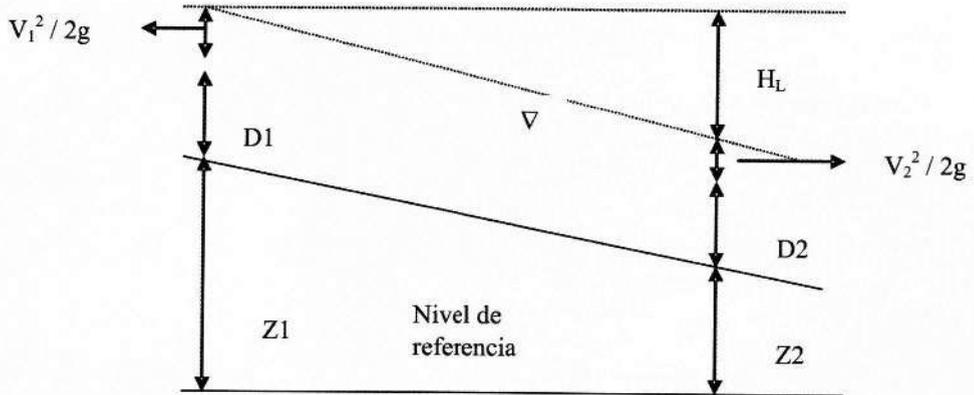


Figura 4: Relaciones de energía en canales abiertos

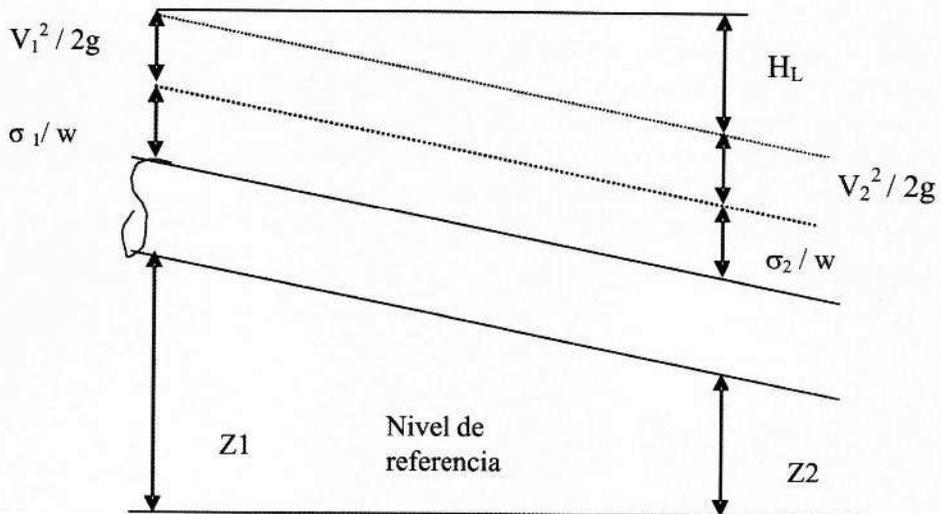


Figura 5: Relaciones de energía en tubo

La ecuación de Bernoulli para el anterior ejemplo puede ser descrita en unidades de energía por unidad de presión como:

$$Z_1 + D_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + D_2 + \frac{V_2^2}{2g} + H_L \quad 3$$

Para canales, y

$$Z_1 + \frac{\sigma_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{\sigma_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g} + H_L \quad 4$$

para tubos, donde Z es la elevación considerando un nivel de referencia arbitrario (m), D es la altura del flujo en canales abiertos (m), σ es la presión en un tubo (kg m^{-2}), w es el peso unitario del agua, kg m^{-3} , V es la velocidad promedio del flujo (m seg^{-1}), g es la aceleración de la gravedad (9.8 m seg^{-2}) y H_L son las pérdidas de carga (m).

Si se desea conocer en que dirección se mueve el agua en un sistema, se tiene que medir las fuerzas o presiones con un piezómetro. Esta presión es relativa y debe de ser medida con respecto a un nivel de referencia (datum). El piezómetro, en su más rústica expresión, es meramente un tubo que contiene una columna de agua que se conecta al punto en que se desea medir la presión. Así, la presión hidrostática se puede expresar como la altura de la columna de agua. Si se mide la distancia L en la que ocurre un cambio de presión h_L se puede determinar el gradiente hidráulico como:

$$\frac{h_1 - h_2}{L} = \frac{h_L}{L} \quad 5$$

El agua fluye en dirección al gradiente hidráulico. Una propiedad que afecta la cantidad de fluido sobre un determinado gradiente, es la viscosidad la cual es una medida de la "facilidad" con que el agua fluye.

La ecuación de Hazen Williams permite estimar el flujo en tuberías a una presión mayor a la atmosférica.

$$Q = 0.28CD^{2.63} S^{0.544} \quad 6$$

donde Q es la descarga en $\text{m}^3\text{seg}^{-1}$ C es un coeficiente relacionado al tipo de material de la tubería, D es el diámetro y S es el gradiente de energía (m/m). Para fines de desarrollo numérico, se puede hacer la igualdad:

$$\frac{h_l}{L} = S \quad 7$$

Por lo que la ecuación 6 se puede reescribir como:

$$\frac{h_l}{L} = \left[\frac{Q}{0.28CD^{2.63}} \right]^{0.54} \quad 8$$

Haciendo algunas sustituciones algebraicas se llega a:

$$h_l = \left[\frac{Q^{1.851} L}{0.094C^{1.851} D^{4.868}} \right] \quad 9$$

Un ejemplo de la aplicación de la ecuación del flujo en tuberías se presenta a continuación. Auxiliándose de la Figura 6, se desea conocer el gasto que sale de un tubo conectado a una cisterna de almacenamiento de agua.

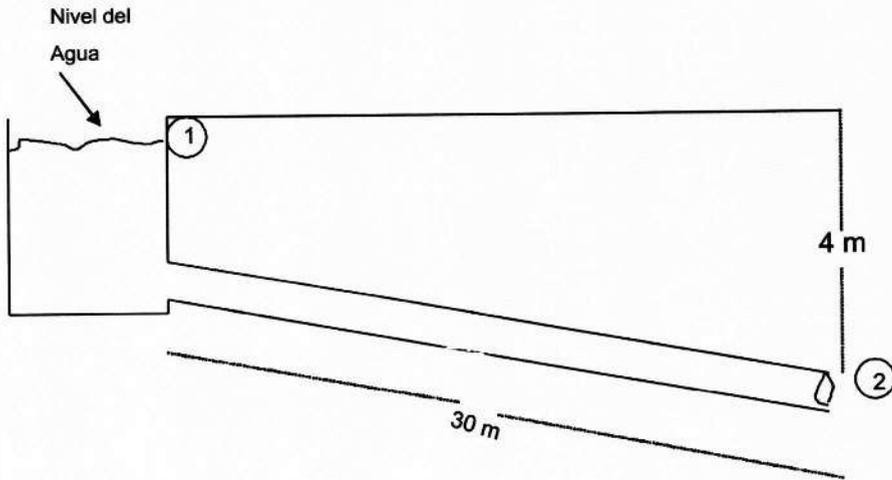


Figura 6: Sistema de agua para los cálculos.

Utilizando la ecuación 4 entre los puntos 1 y 2 se puede asentar que:

$$\frac{\sigma_1}{w} = 0, \quad \frac{V_1^2}{2g} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\sigma_2}{w} = 0 \quad 10$$

Por lo que la ecuación 4 se puede describir:

$$Z_1 - Z_2 = \frac{V_2^2}{2g} + hL \quad 11$$

Del ejemplo $Z_1 - Z_2$ es la diferencia de nivel (4 m) y conociendo que (Darcy Weisbach):

$$hL = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad 12$$

Sustituyendo y combinando las ecuaciones 11 y 12 se tiene que:

$$V = \sqrt{\frac{4(2g)}{f \left(\frac{L}{D} \right) + 1}} \quad 13$$

En la anterior ecuación, el coeficiente de resistencia “ f ” depende de la rugosidad relativa (R_r) la cual resulta del cociente entre la rugosidad del material (ϵ) y el diámetro del tubo (D). Así para el ejemplo $\epsilon = 0.0002$ (para acero comercial) y $D = 0.166'$ por lo que $R_r = 0.0012$. Utilizando el diagrama de Moody “ f ” resulta = 0.021. Así, utilizando la ecuación 13 se tiene:

$$V = \sqrt{\frac{4(2 \times 9.8 \text{ m/seg}^2)}{0.021 \left(\frac{30 \text{ m}}{0.05 \text{ m}} \right) + 1}} = 2.40 \text{ m.seg}^{-1}$$

Utilizando la ecuación de continuidad, se tiene:

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 V = 4.71 \text{ lps}$$

Flujo en canales abiertos: La velocidad del agua en canales se relaciona a la pendiente del gradiente de energía y a la fricción. Una ecuación que comúnmente se usa para analizar el flujo en canales abiertos es la de Manning:

$$V = \left(\frac{1}{n}\right) R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

14

donde V es la velocidad (m seg^{-1}), n es un coeficiente de rugosidad, R es el radio hidráulico que es el cociente del área y el perímetro de mojado (m), S es la pendiente del gradiente de energía (m m^{-1}). Para flujo uniforme, la pendiente del fondo del canal es la misma que la pendiente del gradiente de energía. El Cuadro 5 presenta algunos valores del parámetro n de la ecuación de Manning. La Figura 7 muestra diferentes secciones hidráulicas para canales.

Cuadro 5: Valores del coeficiente de rugosidad de Manning

Tipo de superficie	Coeficiente de rugosidad de Manning
Superficies lisas como plástico o vidrio	0.010
Tubería de acero	0.009 – 0.011
Concreto liso o madera tallada	0.011
Tubería de concreto	0.011 – 0.013
Tubería de arcilla vitrificada	0.012 – 0.015
Concreto monolítico	0.012 – 0.017
Madera en buen estado	0.014
Ladrillo	0.014 – 0.017
Canales de tierra en buenas condiciones	0.017
Cemento rugoso	0.017 – 0.025
Tubo de metal corrugado	0.019 – 0.030
Canales de concreto	0.013 – 0.022
Canales de tierra en regulares condiciones	0.018 – 0.020
Canales de tierra con hierbas	0.025 – 0.030
Canales de piedra	0.035 – 0.040
Canales de piedra rugoso e irregular	0.040 – 0.045
Arroyos naturales en pobres condiciones	0.035
Arroyos con fondo de piedra y secciones irregulares con vegetación.	0.040 – 0.050
Canales con cama de arena y sin vegetación	0.14 – 0.02
Canales con piedras de diversas formas dimensiones	0.050 – 0.070

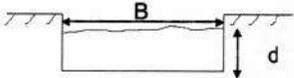
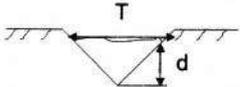
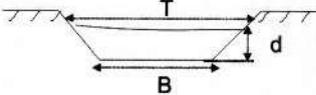
Sección hidráulica	Función que describe la sección hidráulica
	$A = Bd$
	$A = \left(\frac{Td}{2}\right)$
	$A = \left(\frac{B+t}{2}\right)d$
	$A = \frac{2}{3}Td$

Figura 7: Secciones hidráulicas comunes en canales abiertos.

Pérdida de productividad del suelo

Los modelos de simulación hidrológica son representaciones matemáticas del flujo del agua y sus constituyentes como compuestos disueltos y partículas de suelo en suspensión sobre la continuidad suelo – planta – atmósfera cuya capacidad y confiabilidad dependen tanto de la estructura del modelo como de la exactitud en su parametrización (Jasso, *et al* 1999).

En la literatura se pueden distinguir tres grandes tipos de estructuras modelos de simulación del proceso erosivo de los suelos: empíricos locales, empíricos de amplia aplicación y físicamente basados. En todos los casos la tecnología de tele detección y de análisis georeferenciado permite inferencias de amplia cobertura espacial y temporal.

El método mas comúnmente usado en estudios de pérdida de suelo es quizá la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) que, en su versión modificada (EUPSM), ha sido incorporada a modelos de simulación de amplio espectro como el SWAT (Soil

and Water Assessment Tool) y el EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator). La EUPSM permite calcular la tasa de pérdida de suelo por evento lluvioso a partir de datos de escurrimiento superficial como:

$$Y = 11.8(Q, Qp)^{0.56} (K)(C)(P)(LS) \quad 15$$

Donde Y es la tasa de erosión del suelo ($t\ ha^{-1}$), Q el volumen escurrido (mm), Qp es el escurrimiento máximo ($mm\ hr^{-1}$), K es un factor de erodabilidad del suelo, C factor de cobertura vegetal, P es un factor por prácticas de manejo y LS factor de longitud e inclinación de la pendiente. Para la ecuación 1 existen diferentes maneras para cuantificar sus variables; así para el valor de K existe un nomograma desarrollado por Wischmeier y Smith (1978) el cual incorpora variables como: materia orgánica, permeabilidad y estructura del suelo y contenidos porcentuales de partículas primarias.

Relativo al factor C , éste valor se puede obtener de tablas o mediante:

$$C = e^{[-0.223 - cvM] \exp(-0.00115cm) + cvM} \quad 16$$

Con

$$cvM = 1.463 \ln(cva) + 0.1034 \quad 17$$

Donde cm es la cobertura total del suelo ($kg\ ha^{-1}$), cvM es el valor mínimo de C . El factor LS se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^{\xi} (65.41S^2 + 4.565S + 0.06) \quad 18$$

Con

$$\xi = 0.6 \left[1 - e^{(-35.835 S)} \right] \quad 19$$

Donde λ es la longitud de la ladera (m) y s es su pendiente ($m \cdot m^{-1}$).

En cuanto al factor Q de la ecuación 15, el método más común para su cálculo lo constituye el del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de Norte América, conocido como "Curva Numérica" (CN):

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad 20$$

Donde P es la precipitación del evento, y S es la retención potencial del suelo la cual es proporcional a las abstracciones iniciales I_a de acuerdo a un cociente que varía entre 0.095 y 0.38 con una media de 0.2 (que es el valor incorporado en la ecuación 6). Esta ecuación es válida para eventos lluviosos mayores a $0.2S$, de otra forma, $Q = 0$ (Renard, *et al* 1997).

El valor de S de la ecuación 20 se puede obtener a partir de un valor estándar conocido como NÚMERO DE CURVA que representa las características de uso del suelo y su grupo hidrológico (A - D); el grupo A corresponde a los suelos más permeables mientras que el D incluye a los suelos con mayor potencial de escurrimiento.

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} \right) - 1 \quad 21$$

Sánchez *et al* (2002) aplicaron una metodología, que considera al parámetro S como estocástico para utilizar inferencia estadística relativo al valor que debiera utilizarse en procesos de diseño de estructuras de conservación de suelos. Así, el algoritmo hace uso de la distribución log normal para la función probabilística de densidad (fpd) de S como:

$$P_s = \frac{1}{S\sqrt{(2\pi\sigma^2)}} \exp\left[\frac{-(\ln S - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad 22$$

Donde μ y σ^2 son la media y la varianza de los logaritmos de S . De igual manera la distribución probabilística de Q se derivó de la distribución de S como:

$$P_Q(q) = P_s(S) \left| \frac{\partial S}{\partial Q} \right| \quad 23$$

Aplicando el anterior algoritmo a una cuenca experimental en el estado de Zacatecas, los autores lograron definir un valor constante de $CN = 82.21$ lo que define el valor máximo posible para la cuenca en cuestión acorde a la Figura 8.

En esta cuenca, se encontró una correlación del 54% al comparar el sedimento observado durante un año, con el calculado con la EUPSM como lo señala la Figura 9.

Relativo a la pérdida de productividad del suelo por concepto de erosión hídrica, Sánchez (1995) aplicó un algoritmo en el que la relación entre el rendimiento de un cultivo en un año dado (Y_n) bajo condiciones de suelo no disturbadas y el rendimiento del mismo cultivo bajo un suelo sometido a erosión

(X_n), esta dado por:

$$X_n = Y_n \left[a + \frac{(1-a)d_n}{D} \right]; d_n < D \quad X_n = Y_n \quad D \gg d_n \quad 24$$

donde el parámetro "a" se interpreta como el cosciente de X_n y Y_n , d_n es la profundidad del suelo disponible y "D" es el espesor de la capa arable. Ahora, si se

Cuadro 6: Registro histórico de eventos de precipitación y escurrimiento para la cuenca de estudio

Fecha (mda)	Precipitación (mm)	Escurrecimiento (mm)
8/16/85	13.2	1.93
8/17/85	16.7	2.04
8/19/85	14.2	0.34
9/20/85	13.7	0.43
6/22/86	13.0	0.06
6/24/86	13.0	0.27
6/26/86	23.8	0.37
6/27/86	15.0	0.25
7/4/86	37.0	8.77
7/6/86	49.5	15.31
7/9/86	12.1	0.49
8/30/86	20.3	3.57
9/8/86	66.7	44.27
9/10/86	32.2	15.46
9/20/86	37.4	6.70
1/6/86	26.5	1.91
7/15/87	31.8	0.18
7/18/87	30.4	4.35
7/26/87	30.8	0.35
7/27/87	16.4	0.36
7/28/87	65.2	16.22
7/30/87	12.4	0.92
8/4/87	22.7	6.54
8/7/87	22.3	2.23
9/19/87	32.0	8.92
9/24/87	29.5	6.98
9/26/87	65.8	21.64
6/27/88	28.0	1.33
6/28/88	25.5	2.30
7/10/88	26.5	0.15
7/26/88	31.0	6.26
7/30/88	20.0	2.35
8/20/88	20.0	0.26
8/23/88	23.5	0.99
8/24/88	33.1	6.23
9/4/88	17.8	0.28
7/22/90	10.2	2.21
7/24/90	45.2	21.75
7/31/90	20.9	6.87
8/9/90	22.3	5.31
8/12/90	57.5	34.0
8/13/90	20.5	2.63
8/14/90	18.0	4.79
8/16/90	65.3	38.68
8/17/90	29.2	7.66
8/23/90	16.7	4.46
8/26/90	37.3	14.69
8/27/90	7.0	4.55
9/17/90	18.6	8.40
9/18/90	13.2	3.13

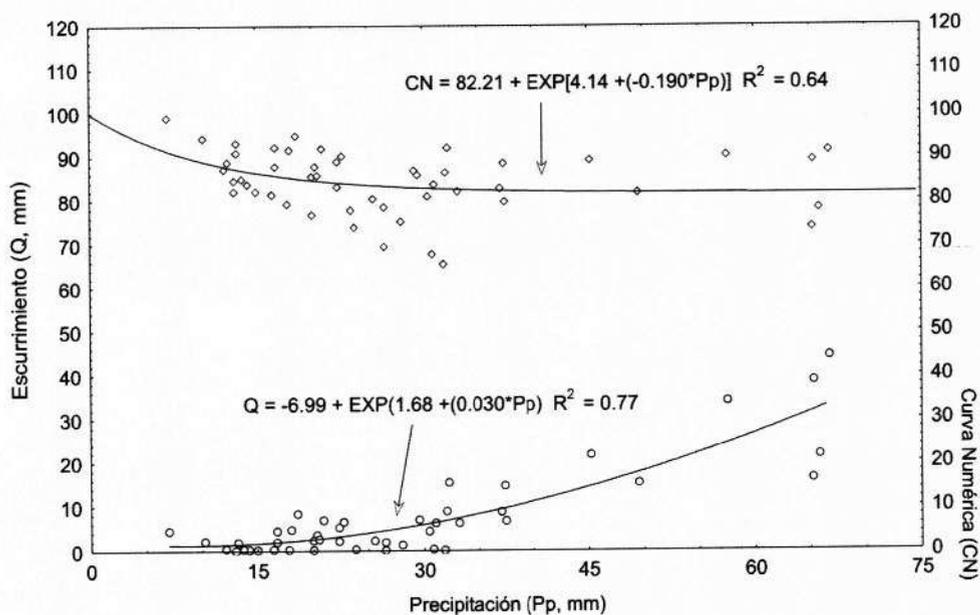


Figura 8: Relación entre la precipitación observada con el valor de CN y Q (Sánchez, *et al* 2002)

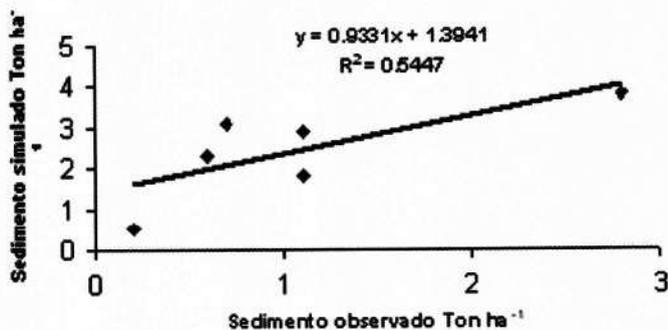


Figura 9: Relación entre el sedimento observado y el calculado con la EUPSM

define a "e" como la pérdida anual de suelo por concepto de erosión, la tasa de pérdida de suelo "r" es entonces dada por:

$$r = \frac{e}{D} \quad 25$$

Luego entonces, el suelo disponible " d_n " se irá degradando acorde a :

$$d_n = D(1-r)^n \quad 26$$

Donde "n" indica el número de año. Si la ecuación 26 se incorpora en la 20, se tiene:

$$X_n = Y_n \left[a + (1-a)(1-r)^n \right] \quad 27$$

Esta ecuación indica el rendimiento X_n que se tendrá en el año enésimo manteniendo una tasa de erosión "r" y partiendo de un rendimiento potencial del cultivo " Y_n ". La Figura 10 señala las series de tiempo obtenidas mediante el algoritmo para la parte alta de la cuenca de los ríos Nazas y Aguanaval en la región hidrológica No. 36. Acorde a la Figura de persistir las tasas actuales de erosión ($62 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) el rendimiento del cultivo maíz oscilará alrededor de 400 kilogramos por hectárea en 10 años.

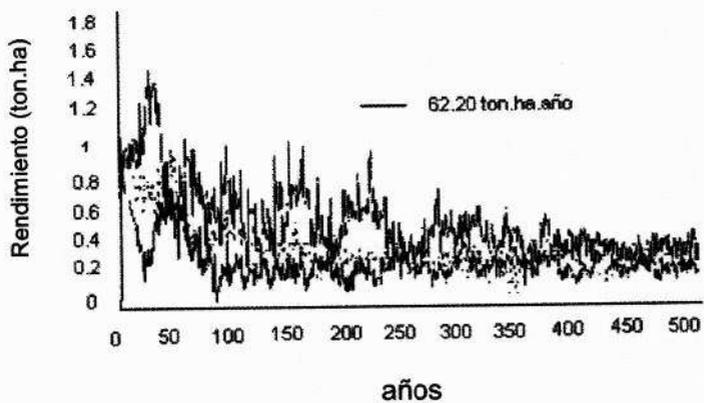


Figura 10: Series de tiempo para la reducción en rendimiento para diferentes tasas de erosión del suelo (Sánchez, 1995).

ANEXO II

Tablas de Conversión

Medidas de Longitud

NOTA: aunque los estándares internacionales exigen el uso del sistema internacional (SI), en algunas unidades se ha conservado la abreviación anglosajona para fines de ubicación con las unidades inglesas.

Medidas de Longitud

UNIDAD	mm	cm	dm	m	km	pulg	pies	Yardas	millas	millas náuticas
milímetro (mm)	1	0.1	0.01	0.001	10 ⁻⁶	0.03937	0.00328	0.00109	6.21x10 ⁻⁷	5.39x10 ⁻⁷
centímetros (cm)	10	1	0.1	0.01	0.0001	0.3937	0.0328	0.0109	6.21x10 ⁻⁶	5.39x10 ⁻⁶
decímetros (dm)	100	10	1	0.1	0.0001	3.937	0.3281	0.1094	6.21x10 ⁻⁵	5.39x10 ⁻⁵
metros (m)	1000	100	10	1	0.001	39.37	3.281	1.094	6.21x10 ⁻⁴	5.39x10 ⁻⁴
kilómetros (km)	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	1	39370	3281	1093.6	0.621	0.5396
pulgadas (in)	25.4	2.54	0.254	0.0254	2.54x10 ⁻⁵	1	0.0833	0.0278	1.58x10 ⁻⁵	1.37x10 ⁻⁵
pies (ft)	304.8	30.48	3.048	0.3048	3.05x10 ⁻⁴	12	1	0.333	1.89x10 ⁻⁴	1.64x10 ⁻⁴
Yardas (yd)	914.4	91.44	9.144	0.9144	9.14x10 ⁻⁴	36	3	1	5.68x10 ⁻⁴	4.93x10 ⁻⁴
millas (mi)	1.61x10 ⁶	1.61x10 ⁵	1.61x10 ⁴	1.61x10 ³	1.6093	63360	5280	1760	1	0.8684
millas náuticas (mi náut)	1.85x10 ⁶	1.85x10 ⁵	1.85x10 ⁴	1853	1.853	72963	6076	2025	1.151	1

Medias de volumen

UNIDAD	cm ³	l	m ³	pulg ³	pie ³	gal.	Acre pie
Centímetro cúbico (cm ³)	1	0.001	10 ⁻⁶	0.06102	3.53x10 ⁻⁵	2.64x10 ⁻⁴	8.1x10 ⁻¹⁰
litro (l)	1000	1	0.001	61.023	0.0353	0.26417	8.1x10 ⁻⁷
metro cúbico (m ³)	10 ⁶	1000	1	61023	35.314	264.17	8.107x10 ⁻⁴
Pulgada cúbica (in ³)	16.39	1.64x10 ⁻²	1.64x10 ⁻⁵	1	5.79x10 ⁻⁴	4.33x10 ⁻³	1.218x10 ⁻⁸
Pie Cúbico (ft) ³	28317	28.317	0.02832	1728	1	7.481	2.296x10 ⁻⁵
Galón (gal)	3785.4	3.785	3.785x10 ⁻³	231	0.13368	1	3.069x10 ⁻⁶
acre pie (af)	1.233x10 ⁹	1.233x10 ⁶	1233.5	75.27x106	43560	3.26x10 ⁵	1

Medidas de área

UNIDAD	cm ²	m ²	km ²	hectárea	pulg ²	pie ²	yarda ²	millas ²	Acre
cm ²	1	0.0001	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁸	0.155	1.08x10 ⁻³	1.2x10 ⁻⁴	3.861x10 ⁻¹¹	2.471x10 ⁻⁸
metros ² (m ²)	10 ⁴	1	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	1550	10.76	1.196	3.871x10 ⁻⁷	2.47x10 ⁻⁴
km ²	10 ¹⁰	10 ⁶	1	100	1.55x10 ⁹	10.76x10 ⁶	1.196x10 ⁶	0.3861	247.1
hectáreas (ha)	10 ⁸	10 ⁴	0.01	1	1.55x10 ⁷	10.76x10 ⁴	1.196x10 ⁴	3.861x10 ⁻³	2.471
pulg ² (in ²)	6.452	6.4x10 ⁻⁴	6.45x10 ⁻¹⁰	6.45x10 ⁻⁸	1	6.94x10 ⁻³	7.7x10 ⁻⁴	2.49x10 ⁻¹⁰	1.574x10 ⁻⁷
pie ² (sq ft)	929	0.0929	9.29x10 ⁻⁸	9.29x10 ⁻⁶	144	1	0.1111	3.587x10 ⁻⁸	2.3x10 ⁻⁵
yarda ² (sq yd)	8361	0.8361	8.36x10 ⁻⁷	8.36x10 ⁻⁵	1296	9	1	3.23x10 ⁻⁷	2.07x10 ⁻⁴
millas ² (sq mi)		2589998	2.59	259		27.87x10 ⁶	3.098x10 ⁶	1	640
Acre (Ac)	40.4x10 ⁶	4047	4.047x10 ⁻³	0.4047	6.27x10 ⁶	43560	4840	1.562x10 ⁻³	1

ANEXO III

Códigos Fuente

PROGRAMAS DEL CAPITULO V

PROGRAM PARAM

```
C*****  
C ESTE PROGRAMA LEE UN ARCHIVO DE DATOS CON FORMATO LIBRE Y  
*  
C CALCULA LOS TRES MOMENTOS: MEDIA, DESVIACION ESTANDAR Y SESGO  
*  
C*****  
  INTEGER I  
  REAL PP(10000),MEDIA  
  CHARACTER * 10 UNAME  
  WRITE(*,20)  
20 FORMAT(//6X, 'CUAL ES EL DRIVE Y NOMBRE DEL ARCHIVO? ->', $)  
  READ(*,41) UNAME  
  WRITE(*,21)  
21 FORMAT(//6X, 'CUAL ES LA LONGITUD DEL ARCHIVO?  ->', $)
```

```
READ(*,*)N
TOTPP = 0
OPEN (100, FILE = UNAME, STATUS = 'OLD')
C*****
C  LEE DATOS Y CALCULA MEDIA ARITMETICA      *
C*****
  DO I = 1, N
    READ(100, FMT = 25, END = 35) PP(I)
    TOTPP = TOTPP + PP(I)
25 FORMAT(F5.2)
  ENDDO
35 CONTINUE
  MEDIA = TOTPP/(N)
C*****
C  REGRESA EL ARCHIVO, LEE DATOS Y CALCULA LAS DIFERENCIAS DE (X -
MEDIA) AL* C CUADRADO Y (X - MEDIA) AL CUBO Y LOS MOMENTOS
RESPECTIVOS      *
C*****
  REWIND 100
  SUMDIF = 0
  SUMCUB = 0
  DO I = 1,N
    READ(100, FMT = 36, END = 37)PP(I)
    SUMD = (PP(I) - MEDIA)**2
    SUMDIF = SUMDIF + SUMD
    CUBDIF = (PP(I) - MEDIA)**3
    SUMCUB = SUMCUB + CUBDIF
36 FORMAT(F5.2)
  ENDDO
37 CONTINUE
  VAR = SUMDIF/(N-1)
  STDR = SQRT(VAR)
  CS = (SUMCUB*N) / ((N-1)*(N-2)*(STDR**3))
  WRITE(*,40)
40 FORMAT(30(/))
  WRITE(*,*) ' LA MEDIA ARITMETICA ES  -> ', MEDIA
  WRITE(*,*) ' LA VARIANZA ES          -> ', VAR
  WRITE(*,*) ' LA DESVIACION ESTANDAR ES -> ', STDR
  WRITE(*,*) ' EL COEFICIENTE DE SESGO ES -> ', CS
41 FORMAT (A10)
  STOP
  END
```

PROGRAMA RANDO2

```

C*****
C ESTE PROGRAMA GENERA NUMEROS PSEUDO-ALEATORIOS DE UNA *
C DISTRIBUCION UNIFORME «U[0,1]» O «U[A,B]» PARA SER USADOS *
C EN LA GENERACION DE VARIABLES SINTETICAS DE OTRAS *
C DISTRIBUCIONES.USA UNA FUNCION CON EL METODO MULTIPLICATIVO*
C ABRE UN ARCHIVO LLAMADO «DATOS» DONDE ALMACENA LOS NUMEROS *
C GENERADOS. *
C*****
PROGRAM RANDO2
  INTEGER I
  REAL RAND
  CHARACTER * 10 ANSW

C*****
C INICIALIZA CON UNA SEMILLA PROVEEIDA POR EL USUARIO *
C*****
  WRITE (*,10)
  10 FORMAT (//6X,'DEME EL VALOR DE UNA SEMILLA O NUMERO INICIAL—>', $)
  READ (*,*) IX

C*****
C ABRE UN ARCHIVO LLAMADO 'DATOS' DONDE GUARDA LOS « N « *
C NUEMROS GENERADOS *
C*****
  OPEN (20, FILE = 'DATOS', STATUS = 'UNKNOWN')
  WRITE (*,30)
  30 FORMAT (//6X,'CUANTOS NUMEROS DESEA GENERAR —>', $)
  READ (*,*) N
  WRITE (*,40)
  40 FORMAT (//6X,'GENERAR EN UN RANGO DIFERENTE U[0,1]? (S,N)—>', $)
  READ (*,50) ANSW
  IF(ANSW .EQ. 'S' .OR. ANSW .EQ. 'S')THEN
    WRITE (*,60)
  60 FORMAT (//6X, 'INTRODUZCA EL INTERVALO SEPARADO POR COMA —>', $)
  READ(*,*)A, B
  DO J = 1, N
    RAN = RAND (IX)
    X = A + (B-A)*RAN
    WRITE (20,*)X

```

```
ENDDO
GOTO 70
ELSEIF (ANSW .EQ. 'N' .OR. ANSW .EQ. 'N') THEN
ENDIF
WRITE (*,*)
WRITE (*,*) '          ESPERE .....ESTOY CALCULANDO'
DO I = 1, N
  RAN = RAND (IX)
  WRITE (20,*) RAN
ENDDO
50 FORMAT (A10)
70 STOP
END
```

C*****

C FUNCION RAND *

C*****

```
FUNCTION RAND (IX)
INTEGER A, P, IX, B15, B16, XHI, XALO, LEFTLO, FHI, K
DATA A/16807/, B15/32768/, B16/65536/, P/2147483647/
XHI = IX/B16
XALO = (IX-XHI*B16)*A
LEFTLO = XALO/B16
FHI = XHI * A+ LEFTLO
K = FHI/B15
IX = ((XALO-LEFTLO*B16) -P+(FHI-K*B15)*B16)+K
IF (IX.LT.0)IX =IX+P
RAND = FLOAT (IX)*4.656612875E-10
RETURN
END
```

PROGRAM NORMAL

```

C*****
C ESTE PROGRAMA CALCULA EL AREA BAJO LA CURVA DE LA FUNCION *
C NORMAL (PROBABILIDAD) CUANDO LOS LIMITES (VALORES DE Z) SON*
C PROPORCIONADOS. EL ALGORITMO EMPLEADO ES EL DE SIMPSON *
C*****
  REAL PI
  PARAMETER (PI = 3.14159)
  REAL A, B
  INTEGER N
  REAL H, DELTAZ, SUMODD, SUMEVE,Z
  INTEGER I

  WRITE(*,30)
  30 FORMAT(/6X, 'LIMITES A INTEGRAR SEPARADOS POR COMA-->', $)
  READ(*,*) A, B
C*****
C ESTABLECE LA FUNCION PAR LOS DOS LIMITES PROPORCIONADOS *
C Y EL INTERVALO DE INTEGRACION *
C*****

  N = 10
  FA = EXP(-(A **2/2.0))/SQRT(2.0 * PI)
  FB = EXP(-(B **2/2.0))/SQRT(2.0 * PI)
  H = (B - A)/N
  DELTAZ = 2.0 * H

  SUMODD = 0.0
  Z = A + H
  DO 10 I = 2, N, 2
  CALL FUNC1 (Z,FZ)
  SUMODD = SUMODD + FZ
  Z = Z + DELTAZ
10 CONTINUE
  SUMEVE = 0.0
  Z = A + DELTAZ
  DO 20 I = 2, N-2, 2
  CALL FUNC1(Z,FZ)
  SUMEVE = SUMEVE + FZ

```

```
Z = Z + DELTAZ
20 CONTINUE
C*****
C FUNCION DE SIMPSON PARA ELVALUAR LA INTEGRAL      *
C*****

SIMPSN = (FA + FB + 4.0 * SUMODD + 2.0 *SUMEVE)* (H/3)
WRITE(*,*) ' LA INTEGRAL EVALUADA EN LOS LIMITES' , A, B
WRITE(*,*) ' ES          ->          ', SIMPSN
WRITE(*,*) ' SIENDO F(Z)    ->          ', FZ
STOP
END

C*****
C SUBROUTINA QUE EVALUA EL VALOR DE Z EN CADA ITERACION  *
C*****
SUBROUTINE FUNC(Z,FZ)
REAL PI
PARAMETER (PI = 3.14159)
FZ = EXP(-(Z **2/2.0))/SQRT(2.0 * PI)
RETURN
END
```

INTEGER I

```

REAL PP(10000),LAMDA,AVGR,PWD,PWW,PDD,PDW
CHARACTER * 20 INAME
C*****
C ESTE PROGRAMA LEE UN ARCHIVO CON DATOS DE PRECIPITACION Y *
C OBTIENE EL VALOR DE LOS PARAMETROS PWW, PWD, PDW, Y PDD *
C NECESARIOS PARA LA SIMULACION EN DONDE SE REQUIERE *
C GENERAR PRECIPITACION *
C*****

C*****
C INICIALIZA VARIABLES Y LEE EL ARCHIVO DE DATOS *
C*****

      WFW =0
      DFW=0
      WFD=0
      DFD=0
      WRITE(*,10)
10 FORMAT(//,6X, 'NOMBRE DEL ARCHIVO CON LOS DATOS -->', $)
      READ(*,25) INAME
      WRITE(*,11)
11 FORMAT(//,6X, 'LONGITUD DEL ARCHIVO -->', $)
      READ(*,*)N
      OPEN(12, FILE= INAME, STATUS='OLD')
      SPP =0
      READ (12,50)PP(1)
      SPP = SPP + PP(1)
      IF(PP(1) .GT. 0)THEN
          PP(1)=1
      ELSE
          PP(1)=0
      ENDIF
      WRITE(*,*)
      WRITE(*,*)
      WRITE(*,*) ' UN MOMENTO ESTOY LEYENDO Y CALCULANDO'
C*****
C REALIZA LOS CALCULOS CONTANDO LAS FRECUENCIAS PARA CADA CASO*
C*****

```

```
DO 20 I=2,N
  READ(12,50) PP(I)
  SPP =SPP + PP(I)
  IF(PP(I) .GT. 0)THEN
    PP(I)=1
  ELSE
    PP(I)=0
  ENDIF
  IF (PP(I-1) .EQ. 0 .AND. PP(I) .EQ. 0)THEN
    DFD=DFD+1
  ELSEIF (PP(I-1) .EQ. 0 .AND. PP(I) .EQ. 1)THEN
    WFD =WFD+1
  ELSEIF(PP(I-1) .EQ. 1 .AND. PP (I) .EQ. 0)THEN
    DFW=DFW+1
  ELSEIF (PP(I-1) .EQ. 1 .AND. PP(I) .EQ. 1)THEN
    WFW = WFW+1
  ENDIF
20 CONTINUE
25 FORMAT(A20)
C50 FORMAT(F5.2)
50 FORMAT(24X,F5.2)
C*****
C PRESENTA EN PANTALLA LOS RESULTADOS OBTENIDOS *
C*****
  PWW = WFW/(WFW+DFW)
  PWD = WFD/(WFD+DFD)
  PDW = DFW/(DFW+WFW)
  PDD = DFD/(DFD+WFD)
  AVGR = SPP/N
  LAMDA = 1/AVGR
  WRITE(*,*) '      PWW = ', PWW
  WRITE(*,*) '      PWD = ', PWD
  WRITE(*,*) '      PDW = ', PDW
  WRITE(*,*) '      PDD = ', PDD
  WRITE(*,*) ' MEDIA ARTMETICA = ', AVGR
  WRITE(*,*) ' LAMNDA (1/MEDIA) = ', LAMDA
  STOP
  END
```

PROGRAMAS DEL CAPITULO VI
PROGRAMASCE

```
INTEGER I, ANSW, DAY(300), DRY, WET, SIMU
REAL PRGD, LAMNDA, RAN (1000)
```

```
DOUBLE PRECISION X, SEED
```

```
OPEN(20, FILE = 'PP.OUT', STATUS= 'UNKNOWN')
```

```
WRITE(*,*) ' LA TEXTURA DEL SUELO SE AGRUPA COMO SIGUE'
```

```
WRITE(*,*)
```

```
WRITE(*,*) '          LIGERO —> = 1'
```

```
WRITE(*,*) '          MEDIO —> = 2'
```

```
WRITE(*,*) '          PESADO —> = 3'
```

```
WRITE(*,*)
```

```
WRITE(*,10)
```

```
10 FORMAT(/6X, ' CUAL ES LA TEXTURA DE TU SUELO? —>', $)
```

```
READ(*,*) ANSW
```

```
IF(ANSW .EQ. 1) THEN
```

```
    TH = 4.1
```

```
ELSEIF(ANSW .EQ. 2) THEN
```

```
    TH = 3.5
```

```
ELSEIF(ANSW .EQ. 3) THEN
```

```
    TH = 2.0
```

```
ENDIF
```

```
WRITE(*,*) 'BASE DE DATOS LA CONFORMAN LAS SIGUIENTES ESTACIONES'
```

```
WRITE(*,*) '          1. MATAMOROS'
```

```
WRITE(*,*) '          2. CENID'
```

```
WRITE(*,*) '          3. SAN JUAN GPE'
```

```
WRITE(*,*) '          4. SAN PEDRO DEL GALLO'
```

```
WRITE(*,*) '          5. SAN LUIS DEL CORDERO'
```

```
WRITE(*,*) '          6. PRESA DE GUADALUPE'
```

```
WRITE(*,*) '          7. SAN PEDRO DE LAS COLONIAS'
```

```
WRITE(*,*) '          8. CEBALLOS'
```

```
WRITE(*,*) '          9. SANTA MARIA DEL ORO'
```

```
WRITE(*,*) ' 10. VIESCA'  
WRITE(*,*) ' 11. LERDO'  
WRITE(*,*) ' 12. TLAHUALILO'  
WRITE(*,*) ' 13. RODEO'  
WRITE(*,*) ' 14. MAPIMI'  
WRITE(*,*) ' 15. NAZAS'  
WRITE(*,*) ' 16. CUENCAME'  
WRITE(*,*) ' 17. PARRAS'  
WRITE(*,*) ' 18. PEÑON BLANCO'  
WRITE(*,*) ' 19. EL DERRAME'  
WRITE(*,*) ' 20. INDE '  
WRITE(*,*) ' 21. LAS NIEVES'  
WRITE(*,*) ' 22. SAN J. RIO'  
WRITE(*,20)
```

```
20 FORMAT(//6X, ' CUAL ES LA ESTACION ELEGIDA? ->', $)
```

```
READ(*,*) ANSW2  
IF(ANSW2 .EQ. 1)THEN  
  PRGD = 0.088  
  LAMNDA = 0.191  
ELSEIF(ANSW2 .EQ.2)THEN  
  PRGD = 0.062  
  LAMNDA = 0.151  
ELSEIF(ANSW2.EQ.3)THEN  
  PRGD = 0.088  
  LAMNDA = 0.126  
ELSEIF(ANSW2.EQ.4)THEN  
  PRGD = 0.085  
  LAMNDA = 0.153  
ELSEIF (ANSW2 .EQ.5)THEN  
  PRGD = 0.072  
  LAMNDA = 0.123  
ELSEIF (ANSW2.EQ.6)THEN  
  PRGD = 0.056  
  LAMNDA = 0.131  
ELSEIF (ANSW2.EQ.7)THEN  
  PRGD = 0.048  
  LAMNDA = 2.17  
ELSEIF (ANSW2.EQ.8)THEN  
  PRGD = 0.126  
  LAMNDA = 0.253  
ELSEIF(ANSW2.EQ.9)THEN
```

```
PRGD = 0.081
LAMNDA = 0.106
ELSEIF(ANSW2.EQ.10)THEN
  PRGD = 0.043
  LAMNDA = 0.117
ELSEIF (ANSW2 .EQ.11)THEN
  PRGD = 0.075
  LAMNDA = 2.61
ELSEIF (ANSW2 .EQ.12)THEN
  PRGD = 0.069
  LAMNDA = 0.149
ELSEIF (ANSW2 .EQ. 13)THEN
  PRGD = 0.097
  LAMNDA = 0.164
ELSEIF(ANSW2 .EQ. 14)THEN
  PRGD = 0.062
  LAMNDA = 0.138
ELSEIF (ANSW2 .EQ. 15)THEN
  PRGD = 0.091
  LAMNDA = 0.173
ELSEIF (ANSW2 .EQ.16)THEN
  PRGD = 0.067
  LAMNDA = 0.183
ELSEIF (ANSW2 .EQ. 17)THEN
  PRGD = 0.108
  LAMNDA = 0.154
ELSEIF (ANSW2 .EQ. 18)THEN
  PRGD = 0.058
  LAMNDA = 0.108
ELSEIF (ANSW2 .EQ. 19)THEN
  PRGD = 0.035
  LAMNDA = 0.130
ELSEIF (ANSW2.EQ. 20)THEN
  PRGD = 0.032
  LAMNDA = 0.103
ELSEIF (ANSW2 .EQ. 21)THEN
  PRGD = 0.049
  LAMNDA = 0.151
ELSEIF (ANSW2.EQ. 22)THEN
  PRGD = 0.097
  LAMNDA = 0.205
```

ENDIF

C EMPIEZAN LAS SIMULACIONES

WRITE(*,30)

30 FORMAT(/6X,'SIMULACIONES PARA PAREMETRIZAR? ——>',\$)

READ(*,*) SIMU

WRITE(*,40)

40 FORMAT(/6X, ' INTRODUCIR UNA SEMILLA ——>',\$)

READ(*,*) SEED

C*****

C INICIALIZA VARIABLES *

C*****

TOTWR = 0

TOTRUN = 0

DAYR = 0

DAYRWR = 0

DAY(1) = DRY

WET = 1

RAN(1) = 0.2

DRY = 0

C*****

C GENERA PRECIPITACION *

C*****

DO J =2, SIMU

C SEED = SEED*J

CALL RANA (SEED,J, RAN(J))

IF (DAY(J-1) .EQ. DRY .AND. RAN(J) .LT. PRGD)THEN

DAY(J) = WET

DAYR = DAYR +1

CALL RANA(SEED,J,RAN(J))

RAIN = ALOG(RAN(J))/(- LAMNDA)

C RAIN = 1 - (EXP((-LAMNDA)*RAN(J)))

C*****

C CALCULA DIAS CON ESCURRIMIENTO *

C Y GENERA PARAMETROS A Y TETA *

C*****

RUNOFF = RAIN - TH

IF (RUNOFF .GT.0)THEN

TOTWR = TOTWR +1

```

ELSEIF (RUNOFF .LT. 0)THEN
  RUNOFF = 0
  DAYRWR = DAYRWR +1
ENDIF
TOTRUN = TOTRUN + RUNOFF
ELSE
  DAY(J) = DRY
  RAIN = 0
  RUNOFF = 0
ENDIF
WRITE(20,80)RAIN
ENDDO
C  A = DAYRWR/DAYR
  A = 1 - (TOTWR/DAYR)
  ZMEAN = TOTRUN/TOTWR
  TETA = 1/ZMEAN
C*****
C  CALCULA FUNCION DE DISTRIBUCION DE Z *
C*****
  DAY(1) = DRY
  TOTWR = 0
  WET =1
  RAN(1) = 0.2
  DRY = 0
  WRITE(*,*)
  WRITE(*,50)
50 FORMAT(//6X,'SIMULACIONES PARA PAREMETRIZAR Z? ——>',$)
  READ(*,*) SIMU
  WRITE(*,40)
60 FORMAT(//6X, ' INTRODUCIR UNA SEMILLA ——>',$)
  READ(*,*) SEED

DO J =2, SIMU
C  SEED = SEED*J

CALL RANA (SEED,J, RAN(J))
IF (DAY(J-1) .EQ. DRY .AND. RAN(J) .LT. PRGD)THEN
  DAY(J) = WET
  DAYR = DAYR +1

```

```

CALL RANA(SEED,J, RAN(J))
RAIN = ALOG(RAN(J))/(- LAMNDA)
RUNOFF = RAIN - TH
IF (RUNOFF .GT.0)THEN
  TOTWR = TOTWR +1
  CALL RANA(SEED,J, RAN(J))
C   TEMP1 = A
C   TEMP2 = (1 - EXP((( -TETA)*RAN(J))))
C   TEMP2 = (1-A)* ALOG(RAN(J))/(-TETA)
C   FX = TEMP1+TEMP2
  TEMP1 = (1/(-TETA))
  TEMP2 = ALOG((1-((RAN(J) -A)/(1-A))))
  FX = TEMP1*TEMP2
  IF (FX .LT. 0)THEN
    FX = FX* (-1)
  ENDIF
C   WRITE (*,*)FX
C   WRITE(20,70) FX
C 70  FORMAT(6X, F6.3)
  ELSEIF (RUNOFF .LT. 0)THEN
    RUNOFF = 0
  ENDIF
ELSE
  DAY(J) = DRY
  RAIN = 0
  RUNOFF = 0
ENDIF
WRITE(*,*)RAIN, RUNOFF,FX
ENDDO
WRITE(*,*) '*****'
WRITE(*,*) '*          PARAMETROS DEL MODELO  *'
WRITE(*,*) '*****'

WRITE(*,*) ' EL PARAMETRO A ES——>      ; A
WRITE(*,*) ' EL PARAMETRO TETA ES——>    ; TETA
WRITE(*,*) ' EL PARAMETRO LAMNDA ES ——>  ;LAMNDA
WRITE(*,*) ' PROBABILIDAD DE LLUVIAISECO ES ——>',PRGD
WRITE(*,*) ' NUMERO DE DIAS CON LLUVIA ES ——>', DAYR, ' DE',SIMU
WRITE(*,*) '*****'
80 FORMAT(14X, F6.3)
STOP

```

END

```
C*****  
C  SUBROUTINA PARA GENERAR NUMEROS  *  
C    ALEATORIOS                      *  
C*****
```

SUBROUTINE RANA (SEED,J, RAN)

```
DOUBLE PRECISION SEED, X  
X = (SEED + 3.141593)**5  
SEED = X - AINT (X)  
RAN = SEED  
IF (RAN. LT. 0 )THEN  
  RAN = RAN * (-1)  
ENDIF  
RETURN  
END
```


Anexo IV

Manual práctico del Facilitator¹

El software Facilitator es dominio público y se puede obtener de la siguiente URL:
<http://facilitator.sourceforge.net/>.

Algunas definiciones

Para el adecuado uso del software Facilitator, es necesario estar familiarizado con algunas definiciones

Alternativas

Una alternativa es un curso de acción posible en relación al problema que se trate. Como parte del uso del software, se espera que él o los usuarios definan posibles alternativas en relación al problema en estudio. Estas alternativas constituyen las hileras de la matriz de decisión descrita posteriormente.

¹ El manual completo en inglés se puede obtener de: http://cvs.sourceforge.net/viewcvs.py/*checkout*/facilitator/facilitator/doc/userguide/index.html#HEAD

¿Como se define una alternativa?

Seleccionar la ventana “alternativa” en el software como:

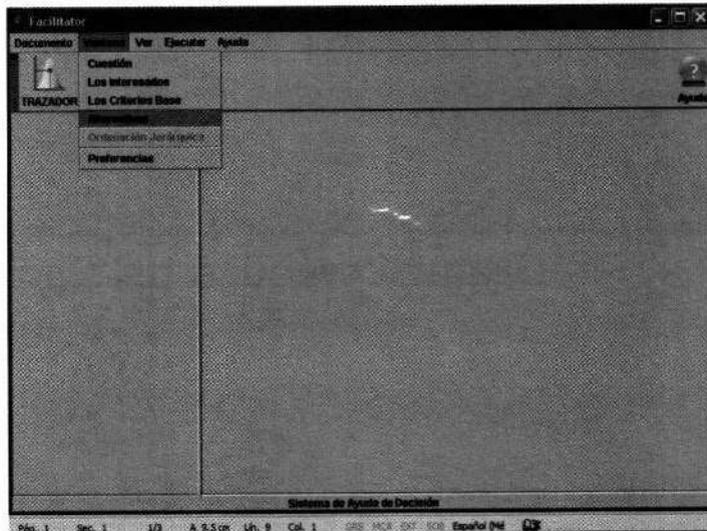


Figura 1: La opción de alternativas en el software

Para añadir una alternativa se tiene que utilizar la tecla “Añadir” del menú de opciones. En esta etapa se puede editar alguna alternativa que ya haya sido capturada anteriormente. También se puede borrar una alternativa seleccionándola y utilizando el botón de “suprimir”.

¿Que papel tienen las alternativas en el software?

El propósito fundamental del software es obtener la mejor alternativa. Cuando se está en proceso de dar valores a las celdas de la matriz de decisión, a cada alternativa se le asigna un valor para cada criterio base.

Criterios

Los criterios base representan los criterios con los cuales se medirá la efectividad de las alternativas. Como parte del análisis se tienen que definir los criterios base los cuales forman las columnas de la matriz de decisión.

Asociada a cada criterio base, se encuentra una función de score (en el capítulo X se trata con mas amplitud esta definición).

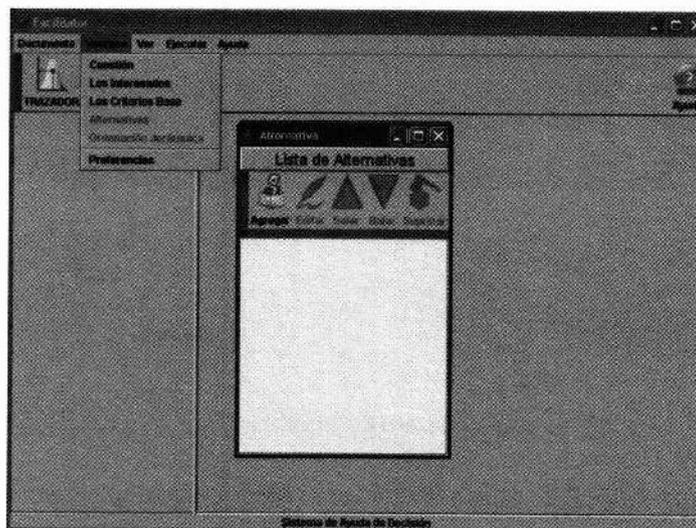


Figura: Figura 2: Ventana que muestra la adición ó edición de alternativas

¿Que diferencia existe entre “criterio base” y “criterio compuesto”?

Los criterios base se utilizan para medir la efectividad de una alternativa; así, cuando se introduce un valor en una celda de la matriz de decisión, se utiliza la función de score especificada para normalizar ese valor. La utilidad de esto es que se hacen “comparables” las variables al eliminar las unidades. Los criterios base se manejan a través de la ventana de “criterios base” del software como:

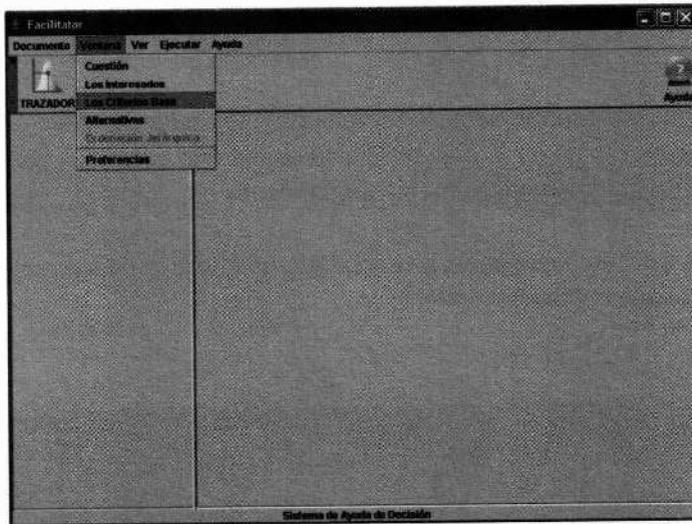


Figura 3: Procedimiento para añadir los criterios base

Criterio Compuesto

Este representa un mecanismo para categorizar o agrupar los criterios base. Por ejemplo, un criterio compuesto como: "Mediciones ambientales", puede agrupar a varios criterios base como: cantidad de elementos en el agua, percolación de contaminantes, etc. Al igual que una alternativa, en la opción de "criterios base" se pueden añadir o editar conforme sea requerido.

Al añadir un criterio, se puede documentar (describir) éste como:

En esa misma ventana aparece la ventana de propiedades en la que se selecciona la "función de score" que define al criterio (véase capítulo X).

Los campos de la pantalla que se refieren a las unidades y cantidades, son solo de documentación y no tienen impacto en los cálculos que realiza el software. Sin embargo, los valores "mínimo" y "máximo" si tienen un impacto en los cálculos ya que en primera instancia definen la forma y pendiente de la función de score que se seleccione. En el capítulo X aparece una breve descripción de los casos comunes en que se usa una determinada función de score.

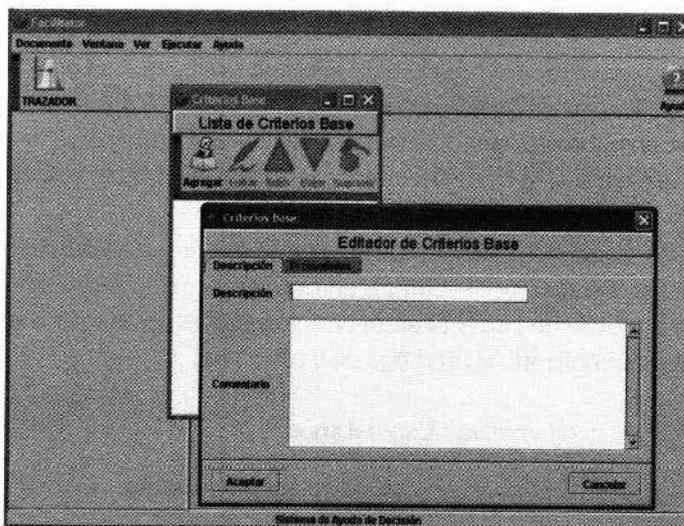


Figura 4: Documentación de un criterio. Pulsar “agregar” y posteriormente “descripción”.

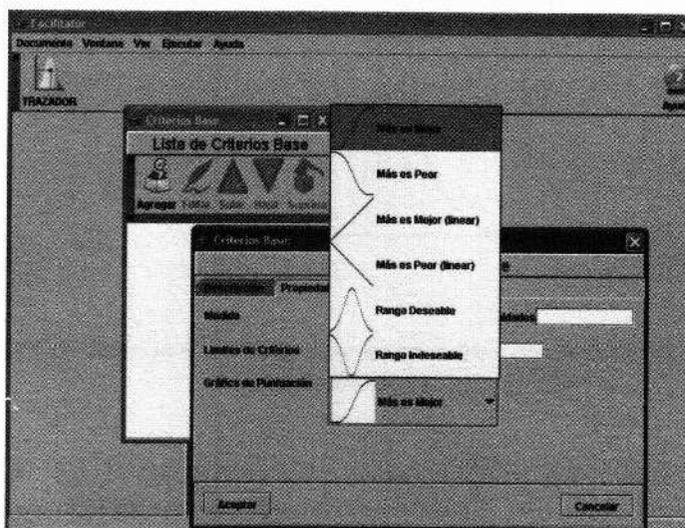


Figura 5: Selección de la función de escore que define al criterio base.

¿Que papel tienen en los criterios base en el software?

Los criterios base miden la efectividad de las alternativas. Las gráficas de escore, se utilizan para graficar los valores “experimentales” convirtiéndolos a valores normalizados y eliminando unidades. Cuando se le dan los valores a una matriz, todas las celdas de una columna en particular, deberán obedecer a la misma función de escore.

Por otro lado, cada celda de la matriz representa la intersección del criterio base con una alternativa. De hecho, el valor de entrada en la celda representa a medición experimental de la efectividad de la alternativa en esa hilera. Este valor experimental es convertido a valor normalizado en el rango de 0 a 1 como:

Alternativa : Uso del agua

Criterio: Profundidad del manto acuífero

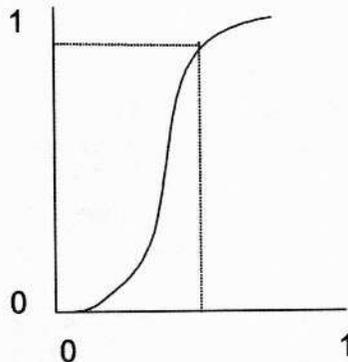


Figura 6: Procedimiento intrínseco del software para la normalización de datos experimentales

El eje horizontal representa el valor experimental (para el ejemplo es cercano a 0.6). La función de escore elegida es “mas es mejor” (véase capítulo X) . El eje vertical representa el valor normalizado (para el ejemplo alrededor de 0.9). Es muy importante mantener presente que si se cambia el tipo de función, el valor mínimo o el valor máximo impactarán los resultados. También, si las funciones escore que presenta el software como opciones no satisfacen los requerimientos del problema específico, se puede hacer la normalización utilizando la función “mas es mejor lineal” para todos los criterios teniendo como mínimo 0 y máximo 1. Esta función lineal sigue una línea de 45° por lo

que el valor del eje horizontal resulta en el mismo valor en el eje vertical. Normalmente, esta opción se usa cuando se cuenta con la opinión de expertos "in situ".

Interesados ó líderes de opinión

Un interesado ó líder de opinión para el caso del DSS, es considerado aquella persona, grupo u organismo que se verá afectado por las decisiones que se tomen en relación a algún problema. En el software se podrán añadir el número de interesados que se juzgue conveniente para una adecuada toma de decisiones. Es importante que en este grupo esten representados los intereses de la sociedad en su conjunto.

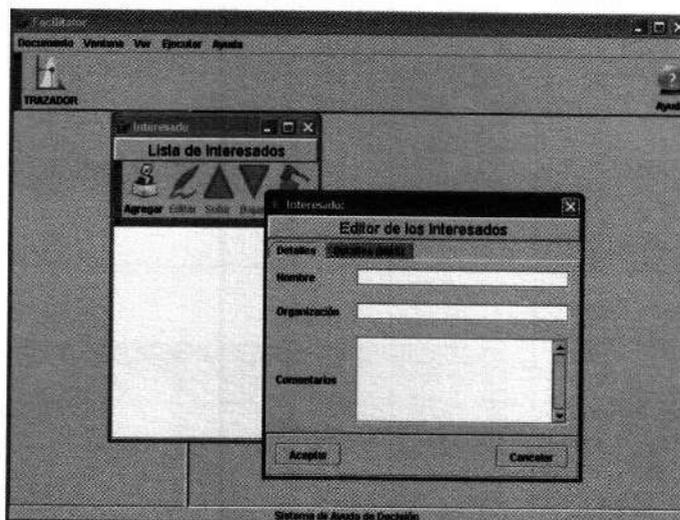
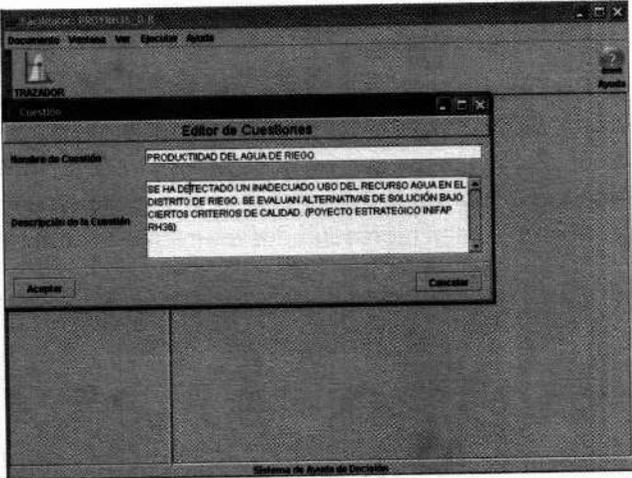
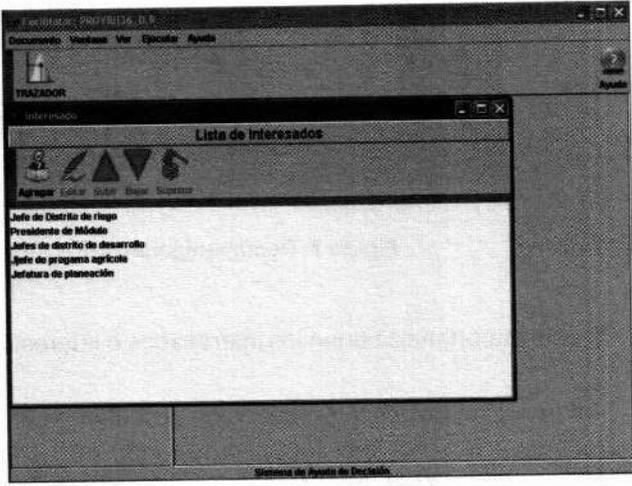


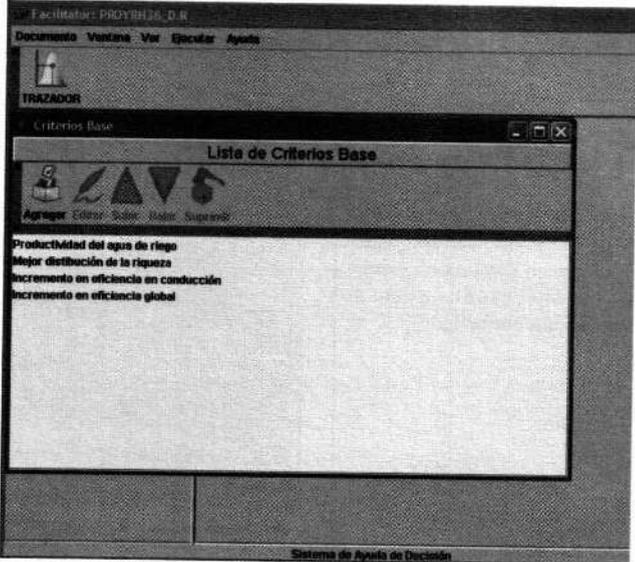
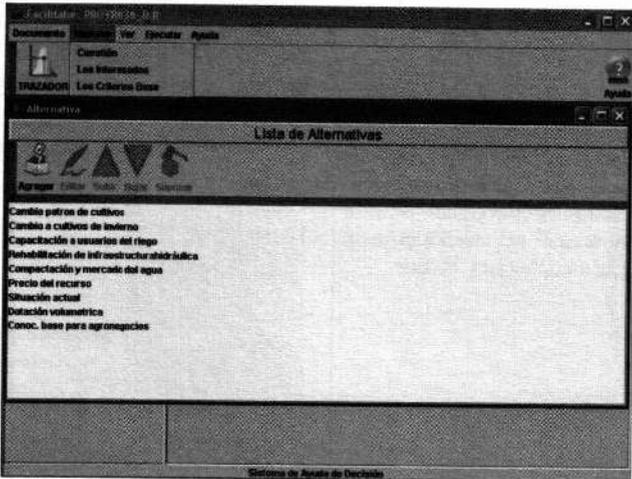
Figura 7: Documentación de los interesados

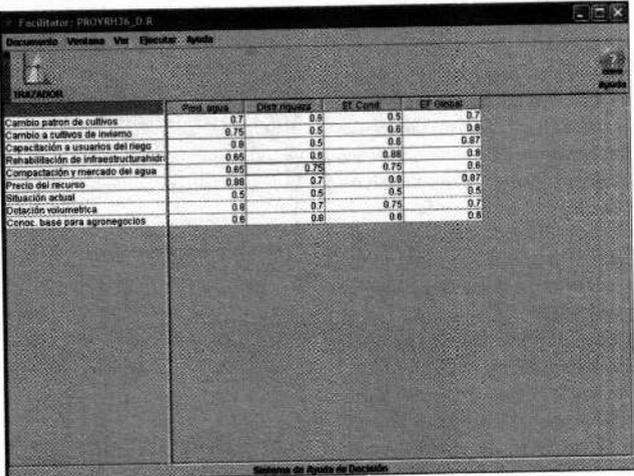
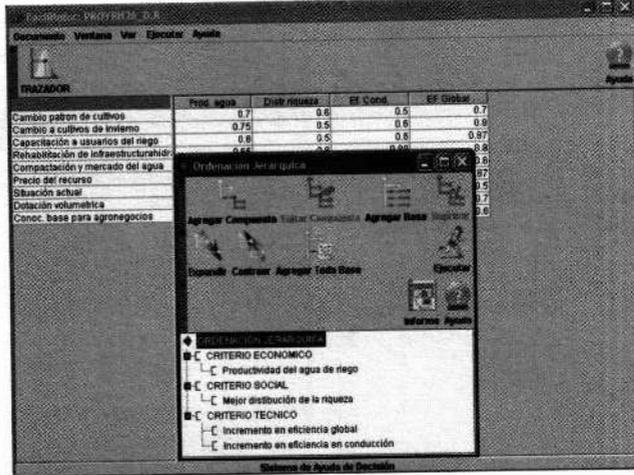
¿Que importancia tienen los interesados o líderes de opinión en el software?

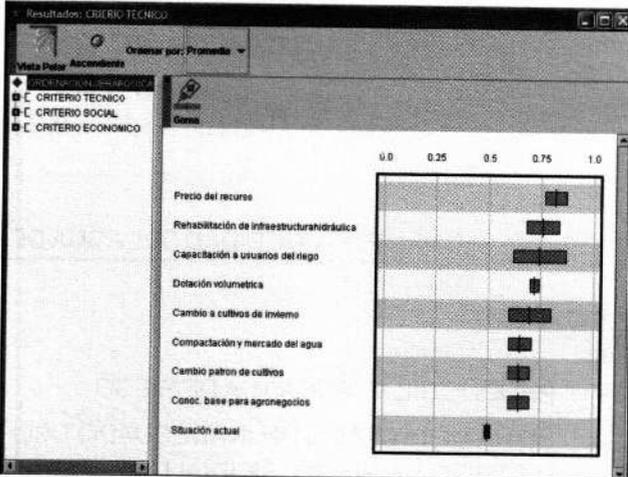
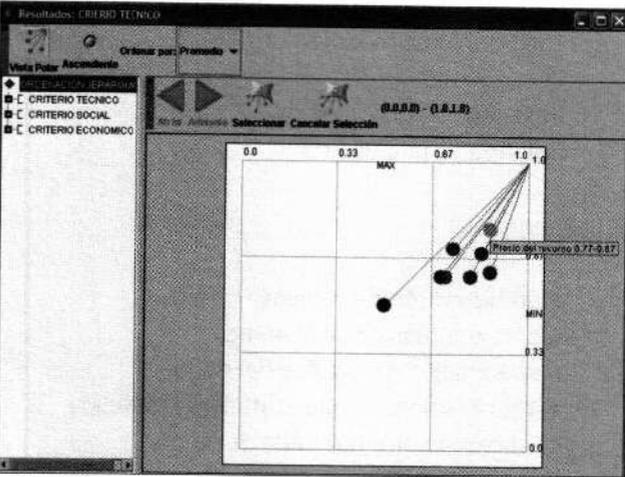
La inclusión de los interesados en el software constituye solamente un proceso de documentación del ejercicio. En los reportes que genera el software se puede apreciar quienes participaron en la toma de decisiones, con que interés y los datos generales que permitan el establecimiento de contactos para procedimientos futuros.

Cuadro 1: Ejemplo grafico del uso del DSS Facilitator

DESCRIPCIÓN	PANTALLA DEL SOFTWARE
<p>Se define el problema alrededor del cual se desarrolla el ejercicio haciendo una breve descripción del mismo. En este paso, es necesario que quede claro para los participantes los alcances y límites de la solución</p>	
<p>En esta pantalla se capturan los interesados o líderes de opinión que participan en el proceso de planeación. Es deseable que los participantes estén presentes durante todo el proceso de planeación y análisis de alternativas.</p>	

DESCRIPCIÓN	PANTALLA DEL SOFTWARE
<p>Se presentan los criterios mediante los cuales será medida la efectividad de las alternativas. Es importante que éstos sean entendidos por todos. Estos criterios conformarán las columnas de la matriz de decisión. En esta pantalla también se elige la función de score que define al criterio como se ha señalado líneas arriba. El procedimiento es posicionar el cursor en un determinado criterio y posteriormente pulsar la pestaña de "propiedades". Si se cuenta con la opinión de expertos, entonces se elige la función "mas es mejor lineal" y se pide a los asistentes que califiquen el impacto de la alternativa en cada criterio de calidad en una escala de 0 a 1 calificando a la alternativa actual con 0.5.</p>	
<p>Las alternativas son aquellas acciones o cursos de acción relativas al problema. Estas forman las hileras de la matriz de decisión</p>	

DESCRIPCIÓN	PANTALLA DEL SOFTWARE																																																		
<p>Toda vez que se han capturado los criterios y las alternativas, se conforma (automáticamente por el software) la matriz. En el caso de la función de score "mas es mejor lineal", los valores de esta matriz (experimental) son proporcionados por los interesados como se mencionó anteriormente.</p>	 <p>The screenshot shows a window titled 'Facilitador: PNTVIR134_D.R.' with a menu bar (Documento, Ventana, Ver, Ejecutar, Ayuda). Below the menu is a table with the following data:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>ALTERNATIVA</th> <th>Pres. agua</th> <th>Dist. riqueza</th> <th>EF. Cond.</th> <th>EF. Distrib.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cambio patron de cultivos</td> <td>0.7</td> <td>0.5</td> <td>0.5</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td>Cambio a cultivos de invierno</td> <td>0.75</td> <td>0.5</td> <td>0.6</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>Capacitación a usuarios del riego</td> <td>0.6</td> <td>0.5</td> <td>0.6</td> <td>0.87</td> </tr> <tr> <td>Rehabilitación de infraestructurahidr.</td> <td>0.65</td> <td>0.6</td> <td>0.68</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>Compactación y mercado del agua</td> <td>0.65</td> <td>0.75</td> <td>0.75</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td>Precio del recurso</td> <td>0.68</td> <td>0.7</td> <td>0.8</td> <td>0.87</td> </tr> <tr> <td>Situación actual</td> <td>0.5</td> <td>0.5</td> <td>0.5</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>Dotación volumétrica</td> <td>0.6</td> <td>0.7</td> <td>0.75</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td>Conoc. base para agronegocios</td> <td>0.6</td> <td>0.6</td> <td>0.6</td> <td>0.6</td> </tr> </tbody> </table>	ALTERNATIVA	Pres. agua	Dist. riqueza	EF. Cond.	EF. Distrib.	Cambio patron de cultivos	0.7	0.5	0.5	0.7	Cambio a cultivos de invierno	0.75	0.5	0.6	0.8	Capacitación a usuarios del riego	0.6	0.5	0.6	0.87	Rehabilitación de infraestructurahidr.	0.65	0.6	0.68	0.8	Compactación y mercado del agua	0.65	0.75	0.75	0.6	Precio del recurso	0.68	0.7	0.8	0.87	Situación actual	0.5	0.5	0.5	0.5	Dotación volumétrica	0.6	0.7	0.75	0.7	Conoc. base para agronegocios	0.6	0.6	0.6	0.6
ALTERNATIVA	Pres. agua	Dist. riqueza	EF. Cond.	EF. Distrib.																																															
Cambio patron de cultivos	0.7	0.5	0.5	0.7																																															
Cambio a cultivos de invierno	0.75	0.5	0.6	0.8																																															
Capacitación a usuarios del riego	0.6	0.5	0.6	0.87																																															
Rehabilitación de infraestructurahidr.	0.65	0.6	0.68	0.8																																															
Compactación y mercado del agua	0.65	0.75	0.75	0.6																																															
Precio del recurso	0.68	0.7	0.8	0.87																																															
Situación actual	0.5	0.5	0.5	0.5																																															
Dotación volumétrica	0.6	0.7	0.75	0.7																																															
Conoc. base para agronegocios	0.6	0.6	0.6	0.6																																															
<p>Como se explicó en el capítulo X, se puede dar diferente orden a los criterios de calidad así como también se pueden agrupar los criterios en criterios genéricos. Tal es el caso de la pantalla a la derecha en la que los criterios de calidad se agruparon en tres criterios globales: Económico, Social y Técnico.</p>	 <p>The screenshot shows the same software window as above, but with a 'Ordenación jerárquica' dialog box open. The dialog box contains a tree structure for organizing criteria:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> CRITERIO ECONOMICO <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Productividad del agua de riego <input checked="" type="checkbox"/> CRITERIO SOCIAL <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mejor distribución de la riqueza <input checked="" type="checkbox"/> CRITERIO TECNICO <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Incremento en eficiencia global <input type="checkbox"/> Incremento en eficiencia en conducción 																																																		

DESCRIPCIÓN	PANTALLA DEL SOFTWARE
<p>Toda vez que se definió el orden jerárquico (en el presente caso se le otorgó mas peso al criterio técnico) se realiza el análisis y la pantalla resultante (derecha) muestra los resultados. La amplitud de las barras muestra la sensibilidad de la alternativa (mientras mas angosta, quiere decir que hay mayor consenso). En las barras aparece indicado el valor promedio; el orden en que aparecen las barras (si se ordenan por promedio) indican el curso de acción a seguir para solventar el problema (cuestión) planteada. Para el presente caso, nótese que cualquier alternativa que se adopte, es mejor que seguir con la alternativa o curso de acción actual.</p>	
<p>Vista "polar" mientras mas cercana al origen (1, 1) se encuentre la alternativa, significa que la decisión en la alternativa es mas robusta. Las coordenadas de cada punto reflejan el score mínimo y máximo respectivamente.</p>	

Toda vez que se ha culminado con el proceso de análisis, el software es capaz de emitir un informe de resultados en el que aparecen títulos hiper texto que al accionarlos arrojan información que fue documentada al inicio del ejercicio. Para el ejemplo de la tabla anterior el informe es como sigue:

FACILITATOR
Sistema de Ayuda de Decisión de Multiobjetivos

PRODUCTIIDAD DEL AGUA DE RIEGO

Cuestión

PRODUCTIIDAD DEL AGUA DE RIEGO
SE HA DETECTADO UN INADECUADO USO DEL RECURSO AGUA EN EL DISTRITO DE RIEGO. SE EVALUAN ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN BAJO CIERTOS CRITERIOS DE CALIDAD. (POYECTO ESTRATEGICO INIFAP RH36)

Los Interesados

Jefe de Distrito de riego
Presidente de Módulo
Jefes de distrito de desarrollo
Jefe de progama agrícola
Jefatura de planeación

Alternativa

Cambio patrón de cultivos
Cambio a cultivos de invierno
Capacitación a usuarios del riego
Rehabilitación de infraestructura hidráulica
Compactación y mercado del agua
Precio del recurso
Situación actual
Dotación volumétrica
Conocimiento base para agro negocios

Criterios Base

Productividad del agua de riego
Mejor distribución de la riqueza
Incremento en eficiencia en conducción
Incremento en eficiencia global

Matrices

Experimental
Experimental y Normalizado

Ejecuciones

CRIERIO TECNICO
CRITERIO SOCIAL
CRITERIO ECONÓMICO

Referencias Bibliográficas

- Abbaspaur, K. C. 1992. A yield model for use in determining crop insurance premiums. *Agricultural and Forest Meteorology*, 60: 33 – 51.
- Ahrens, C. D. 1988. *Meteorology Today. An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. West Publishing Company. 581 pp.
- Ang, A. H. and W. H. Tang. 1984. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. Vol I and II. J. Willey and Sons Inc. New York.
- Anthes, R. A. 1984. Enhancement of convective precipitation by mesoscale variations in vegetative covering in semiarid regions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 23. 541-54
- Antón, D. 1996. *Ciudades Sedientas. Agua y ambientes urbanos en América Latina*. Ottawa, Ont., CIID, 208 p.
- Antón, D. 1999. *Diversidad, Globalización y la Sabiduría de la Naturaleza*. CIID, Piri Guazú Ed. 302.
- Azarnag, M. R., y E. G. Dunna. 1996. *Simulación y análisis de Modelos Estocásticos*. McGraw Hill. Inc. 282 pp.
- Ball, G. L. 1992. *Introduction to Geographic Information Systems. Lecture and Exercise Notes*. Department of Renewable Natural Resources. The University of Arizona. Tucson, Az. 326 pp.
- Banks, J. 1998. *Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice*. Enginnering and Management Press. 847 pp.
- Berbel, J. 1993. Risk programming in agricultural systems: a multiple criteria analysis. *Agricultural Systems*, 41: 275 – 278.

- Berry, J. K. 1993. Emergence and Role of Natural Resource Information Systems. In: J. K. Berry and W. Ripple eds. *Forestry and Agro forestry, VII. Core Agricultural Literature Project*. Cornell University
- Berry, J. K. 1994. *What GIS is (and isn't): The fundamentals of a new technology*. Berry and associates, Fort Collins, Colorado, USA. 63 pp.
- Boers, Th. M. , M. de Graff, R. A. Feddes and Ben-Asher. 1986. A Linear Regression Model Combined with a Soil Water Balance Model to Design Micro – Catchments for Water Harvesting in Arid Zones. *Agricultural Water Management*. pp 187 - 205
- Bonczek, R.H., C.W. Holsapple and A. Whinston. 1976. Implementation of a decision support system for regional water quality processing. Paper 570. Krannert Graduate School of Management, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Bonczek, R.H., C.W. Holsapple and A. Whinston. 1981. *Foundations of decision support systems*. Academic Press, New York.
- Bramer, D. 2004. WW2010. The Earth's Water Budget storage and fluxes. Department of atmospheric Sciences. University of Illinois. [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/hyd/bdgt.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/hyd/bdgt.rxml)
- Brisson, N., B. Seguin and P. Bertuzzi. 1992. Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 59: 267 – 287.
- Brown, L.R. 1996. *Tough Choices. Facing the challenge of food scarcity*. The Worldwatch Environmental Alert Series. Linda Starke, Series Editor. 159 pp.
- CGIAR, 2000. *Equity, Wellbeing and Ecosystem Health. Participatory Research for Natural Resource Management*. 62 pp.
- Chowdhury, R. N. 1992. Probabilistic risk análisis in geomechanics and water engineering in environmental management. Chap. 2 pp 37 – 70.
- Clarke, R. T. 1973. *Mathematical Models in Hydrology*. Irrigation and Drainage Paper 19. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 281 pp.
- Coles, J. 2004. *Las Grandes Presas, ¿El fin de una época?*. http://www.unesco.org/courier/2000_04/sp/planet.htm
- Coheseen, J. J. And V. T.Covello. 1989. *Risk Analysis: A Guide to Principles and Methods for Analysing Health and Environmental Risk*. Executive Office of the President of the United States.
- Comisión Internacional de Riego y Drenaje. 2005. *Conclusiones de la Conferencia sobre "El Agua Como Catalizador de la Paz"*. <http://www.unesco.org/water/wwap/pccp/index.shtml>
- Comisión Nacional del Agua. 1992. *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento*. Secretaría de Recursos Hidráulicos. 174 pp.

- Comisión Nacional del Agua. 2004. Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Estadisticas/Central/Cap3_Situacion_de_recursos.pdf
- Consejo Nacional de Población. 2005. Secretaría de Gobernación. <http://www.conapo.gob.mx/00cifras/5.htm>
- Crawford-Brown, D. J. 2001. *Mathematical Methods of Environmental Risk Modeling*. Kluwer Academic Publishers. 205 pp.
- Critchley, W., K. Siegert and C. Chapman. 1991. *Water Harvesting. A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Electronic Version. <http://www.fao.org/docrep/U3160E/u3160e00.htm#Contents>
- Darwin, C. 1859. *El origen de las Especies*. Editores Mexicanos Unidos. Primera Edición, 1999. México, D. F. 506 pp.
- Descroix, L., J. L. Gonzalez y J. Estrada. 2004. *La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada*. INIFAP IRD. Gómez Palacio, Dgo. 300 pp.
- Descroix, L., J. F. Nouvelot, y J. E. Avalos. 1997. *Geografía de las lluvias en una cuenca del norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36*. Folleto Científico No. 8. INIFAP ORSTOM. Gómez Palacio, Dgo. 52 pp.
- De Sousa, S. J., J. Chez Peláez y J. Calderón Romero. 2001. *La Cuestión Institucional: de la vulnerabilidad a la sostenibilidad institucional en el contexto de cambio de época*. Proyecto Nuevo Paradigma. Serie Innovación para la Sostenibilidad Institucional. San José Costa Rica: Proyecto ISNAR "Nuevo Paradigma". 79 pp
- Doorembos, J. and A. H. Kassam. 1979. *Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome Italia.
- Eastman, J. R. 1999. *idrisi 32 Tutorial*. Clark Labs. Clark University. 298 pp.
- Eduards, P. N. 2000. *A brief History of Atmospheric General Circulation Modeling*. In David A. Rondall, ed. *General Circulation Development, Past, Present and Future: Proceedings*. P 67 – 70.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1999. *EPA Drinking Water and Health. What You Need to Know*. EPA 816-K-99-001.
- Falkenmark, M. and Carl Widstrand. 1992. «Population and Water Resources: A Delicate Balance.» *Population Bulletin*. Population Reference Bureau
- FAO. 1996. *Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes*. Bazzaz, F and W. Sombroek Eds. FAO and John Wiley Sons.

- Feddes, A. R. 1988. Modeling and Simulation in Hydrologic Systems Related to Agricultural Development: State of the Art. *Agricultural Water Management*, 13:235 – 248
- Fischhoff, B., S. R. Watson and C. Hope. 1984. Defining Risk, *Policy Sciences*, 17: 123 – 139.
- Fregoso, A. 1996. Ciencia y realidad, fe o conocimiento?. Textos y pretextos sobre el pensamiento científico y el pensamiento religioso. Libro III.
- Galarza, V. K. 2000. El agua en el Mundo. Investigación y Desarrollo. Consultoría en Prensa y Comunicación.
- García, D., E. Catalán y Sánchez C. I. 1996. Obtención de Guías de Riego. Caso Región Lagunera. X Congreso Nacional de la Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación. Culiacán Sin. México.
- Gottfried, B. S. 1984. Elements of stochastic process simulation. Prentice-Hall Inc. 99 8-10.
- Ghosh A., and P.H. S. W. Kulatilake. 1987. A fortran program for generation of multivariate normally distributed random variables. *Computer & Geosciences* Vo. 13, No. 3 pp 221 – 233.
- Gottfried, S. B. 1984. Elements of Stochastic Process Simulation. University of Pittsburg. Prentice Hall Inc. 300 pp.
- Guerrero, M. L. 1991. La Ciencia para Todos. Fondo de Cultura Económica. SEP. CONACYT.
- Haan, C. T. 1982. Statistical Methods in Hydrology. The Iowa State University Press. 378 pp.
- Haan, C. T., and R. E. Shulze. 1986. Return Period Flow Prediction with Uncertain Parameters. American Society of Agricultural Engineers. 13 pp.
- Hartwick, J. M., and N. D. Olewiler. 1998. The economics of Natural Resource Use. 2nd. Ed. Addison-Wesley ed. 432 pp.
- Harun, Y. 2004. El engaño del evolucionismo. El Colapso Científico del Darwinismo y su Fundamento Ideológico. Versión electrónica. <http://www.harunyahya.org/other/evolucionismo/evoluc.html>
- Heilman, P., J. Stone, I. Sanchez Cohen; H. Macias Rodriguez and Roy Man.S. 2003. Working Smarter: *proc. Ars/inifap* binational symposium on modeling and remote sensing in agriculture. Aguascalientes mex.
- Hewlett, J. D. 1982. Principles of Forest Hydrology. The University of Georgia Press. Athens, Georgia. U.S.A. 183 pp.

- Holsapple, C.W., and A.B. Whinston. 2001. Decision support systems: A knowledge-based approach. Thomson Learning/Delmar Publishers, Stamford, CT.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1988. Guía Técnica para Producción y Conservación en el Trópico. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. México, D. F.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (INEGI). 2003. Proyección de población estimada a diciembre 2003, con base en proyecciones del Consejo Nacional de Población. (Conapo). México
- Jasso I. R. 1998. Sensitivity of Water and Sediment Yield to Parameter Values and Their spatial Aggregation Using SWAT Watershed Simulation. Model. Ph. D. Dissertation. The University of Arizona. Tucson, Az.
- Jasso, I. R., I. Sánchez-Cohen, J. Stone, A. Melgoza C., J. Simanton y J. Martínez. 1999. Estimación de parámetros para la modelación del escurrimiento superficial y erosión hídrica. In: Uso de lluvia artiicial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos. Libro Científico No. 1 INIFAP CENID RASPA. I. Sánchez-Cohen, J. Stone, R. Jasso. Editores. Pp 75 - 97
- Jasso I. R. 1999. Desarrollo tecnológico para el manejo integral de los recursos naturales en comunidades marginadas del Estado de Durango. Protocolo del proyecto CENID-RASPA. INIFAP . Gomez Palacio Dgo, México
- Jones, P. G. And P. K. Thorton. 1993. A rainfall Generator for Agricultural Applications in the Tropics. Agricultural and Forest Meteorology, 63: 1 – 19.
- Jones, P. D., K.R. Briffa, T.P. Barnett, and S.F.B Tett,. 1998. Millennial Temperature Reconstructions. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology.Data Contribution Series #1998-039.
- NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- Kandel, R. 2003. Water From Heaven. The History of Water From The Big Bang to The Rise of Civilization and Beyond. Columbia University Press. New York. 312 pp.
- Karnieli A. adn M. Fogel. 1987. Simulating the temporal distribution of convective storm rainfall in semi - arid regions. Paper presented at Jerusalem, Symposium on Convective Rain in Semi - Arid Regions, Hebrew University, Jerusalem, Israel. 11 p.
- Keen, P.G.W. and M.S. Morton. 1978. Decision support systems: An organizational perspective. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Kingwell, R. S., D. A. Morrison and A. D. Bathgate. 1992. The Effect of Climatic Risk on Dryland Farm Management. Agricultural Systems, 39: 153 – 175.

- Kirkby, M. J., P.S. Naden, T. P. Burt and D. P. Butcher. 1992. *Computer Simulation in Physical Geography*. John Willey & Sons. 180 pp.
- Klaus D. 1988. *The Origin of Life: More Questions Than Answers, Interdisciplinary Science Reviews*. Vo. 13, No. 14 348 pp.
- Knisel, W. G. 1980. *CREAMS: A field – scale model for chemical, runoff, and erosion from agricultural management systems*. USDA conservation research report No 26.
- Koffman, E. B., and F. L. Friedman. 1987. *Problem Solving and Structured Programming in Fortran 77*. 3rd. Edition. Temple University. 518 pp
- Lacoste, Y. 2003. *El Agua. La lucha por la vida*. Colección Larousse. El mundo contemporáneo. 125 pp.
- Lane, L.J., D. S. Yakowitz, J.J. Stone, M. Hernandez, P. Heilman, B. Imam, J. Msterson and J. Abolt. 1994. *A Multiple Objective Decision Support System for the USDA Water Quality Initiative*. SWRC, Tucson. Az. 8 pp.
- Lane, J. L., J. C. Ascough, and T. E. Hakonson. 1991. *Multiobjective Decision Theory – Decision Support Systems with Embeded Siumulation Models*. Irrigation and Drainage Proceedings. IR Div/ASCE.
- Law, A. M. And Kelton, W. D. 1982. *Simulation Modeling and Analysis*. Mc. Graw Hill Book Co., Inc. New Cork, N.Y.
- Lawrence, P. A. 1996. *The Role of Data Sources and Simulation Model Complexity in Using a Prototype Decision Support System*. Ph. D. Dissertation. School of Renewable Natural Resources. The University of Arizona. Tucson, Az. 332 pp.
- Lawrence, P.A., J. Robinson, and R. Eisner. 2001. *A decision environment: Going beyond a decision framework to improve the effectiveness of decision making in natural resource management*. p. 1613-1618. *In* Ghassemi F. et al. (ed.) *Int. Congr. on Modeling and Simulation (MODSIM 2001)* Canberra, ACT, Australia. 10-13 Dec. 2001.
- Lawrence, P.A. and J. Robinson (ed.) 2002. *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Multiple Objective Decision Support Systems for Land, Water and Environmental Management (MODSS '99)*, Brisbane, Australia. 1-6 August 1999. Report QNRM02143. Queensland Dep. of Natural Resources, QLD, Australia. <http://www.coastal.crc.org.au/modss/conference99.asp>
- Leonard, R. A., W. G. Knisel, and D. A. Still. 1987. *Ground Water Loading Effects of Agricultural Management Systems*. *Trans. ASAE* 30 (5), pp 1403 – 1418.
- Linsley, K. R. 1976. *Rainfall – Runoff models. Systems approach to water management*. McGraw Hill. Pp 17 – 56.

- Macías R. H. 2005. Uso de un sistema para el auxilio en la toma de decisiones relativas al manejo integral del agua en el dr 017, Coahuila y Durango. Tesis Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Postgrado. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo Durango, Mexico.
- Maidment D. R. 1993. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS. *In* Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management. Proceedings of an international conference. Vienna, Austria.
- Manning, J. C. 1987. Applied Principles of Hydrology. Merryl Publishing Company. Columbus Ohio. 278 pp.
- Marin, G. 2003. El Agua y el Desarrollo Humano Sostenible. Principales Problemas y Desafíos. Ingeniería sin Fronteras
- McKimmey, J. M. and H. D. Scott. 1992. Gis Characterization of Beaver Lake Watershed. *In* Proceedings of the AWRRC Research Conference. University of Arkansas. Arkansas, U.S.A.
- Molden, D. F., Rijsberman, Y. Matsuno and U. A. Amarasinghe. 2001. Increasing the productivity of water: A requirement for food and environmental security. Dialogue Working Paper 1. Colombo, Sri Lanka: Dialogue Secretariat. 19 pp.
- Moncada, J. 2001. 1^{ra} Sesión de la H. Junta de Gobierno del INIFAP. INIFAP SAGARPA. National Agency for Space Administration (NASA). 2004. Earth Observatory. http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=4028
- National Research Council. 1999. New Strategies for America's Watersheds. National Academy Press. 311 pp.
- Natural Resources Conservation Service. 1990. Field Office Technical Guide. Conservation Practice Physical Effects (CPPE).
- Natural Resources Conservation Service. 1990. Nation Handbook of Conservation Practices.
- Nouvelot J. F. 1997. Proyecto binacional sobre manejo y uso del agua en las cuencas hidrográficas del Norte de México. Ponencia presentada en el 25 aniversario del CENID-RASPA.
- Neira, T. R. 1999. La Cultura Contra la Escuela. Un ensayo sobre las contradicciones entre cambio social y prácticas educativas. Ariel Ed. 213 pp.
- Nicholson, S. E., 1988. Land Surface Atmosphere Interaction: physical processes and surface changes and their impact. Progress in Physical Geography. 12 (1): 36 - 65
- Oparin, I. A. 1936. Origin of Life. N. York, Dover publications, reprinted 1953. México. 196 pp.

- Oropeza, M. J. L. 1999. Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrológicas. Ponencia presentada en IX Congreso Nacional de Especialistas en Irrigación. Culiacán Sinaloa México.
- Oweis, T., A. Hachum, and J. Kijne. 1999. Water Harvesting and supplementary irrigation for improved water use efficiency in dry areas. SWIM Paper 7. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Peebles, P.J.E., Schramm, D.N., Turner, E.L. & R.G. Kron 1994, «The Evolution of the Universe», *Scientific American*, 271, 29 - 33.
- Philips A. A. 2003. Water Harvesting Guidance Manual. City of Tucson. U.S.A. 41 pp
- Pizzarello, S. 2004. Chemical Evolution and Meteorites: An Update. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*. 34 (1-2): 25 – 34.
- Population Action International. 2004. Sustaining Water. Population and the Future of Renewable Water Supplies. Washington, D. C. (202) 659-1833
- Postel, S. 1997. Last Oasis. Facing Water Scarcity. The Worldwatch Environmental Alert Series. New York, London. 239 pp.
- Power, D.J. 2003. A brief history of decision support systems. Version 2.8. [Online]. [1 p.] Available at <http://DSSResources.COM/history/dsshhistory.html> (accessed 31 May 2003; verified 12 Jan. 2004).
- Prager E. J. y Earle, S. A. 2001. Los Océanos. Un Llamado a la Conciencia Mundial. McGraw Hill. 382 pp.
- Reddy, R. 1983. A Simple Method of Estimating the Soil Water Balance. *Agricultural Meteorology*, 28 : 1-17
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, and D. C. Yoder. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Agricultural Handbook Number 703.384 pp.
- Russel, B. 1980. Ensayos sobre educación. Colección Austral. Madrid, España. 234 pp.
- Sagan, C. 1998. Miles de Millones. Ediciones Barcelona. España, 250 pp.
- Sánchez C. I. 1985. Obtención de un modelo matemático para la optimización de la relación área de siembra área de escurrimiento en el principio de cosecha de agua de lluvia "in situ". Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, N. L.
- Sanchez C. I. 1994. Evaluating Strip Farming Systems: A stochastic Approach. Ph D. Dissertation. Department of Arid Lands Resources Sciences. The University of Arizona. Tucson, A.Z. 120 pp.

- Sánchez, C. I. 1995. Erosión Potencial en la Comarca Lagunera. Serie folletos INIFAP ORSTOM No.4 Gómez Palacio Durango, México. 30 pp.
- Sánchez, C. I., V. L. Lopes, D. C. Slack and M. Fogel. 1997. Water Balance Model for Small Scale Water Harvesting Systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 123, No. 2 pp 123 – 128.
- Sanchez C. I., Velázquez V. M y R. Jasso I. 2003. Caracterización de la retención potencial máxima de humedad en el suelo del método SCS – CN . Aplicación a una cuenca de México. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XVIII, num 3, pp. 111 – 117.
- Sanchez-Cohen I. 1995. Assesing Risk for Water Harvesting Systems in Arid Environments. J. Soil and Water Cons. 50(5) 446 – 449
- Sánchez, C. I. 2003. Estudio Integral de los Sistemas de Producción Agrícola, Pecuario y Forestal y de los recursos naturales de la Región Hidrológica no. 36 cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval. Proyecto estratégico nacional. Informe anual de avances 2004. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio México
- Schulman, E. 1944. Dendrochronology in Mexico. Tree-Ring, Bulletin 10:18 24.
- Schulman, E. 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. University of Arizona Press, Tucson Az. 142 pp.
- Scott, S. D. 1966. Dendrochronology in Mexico. Papers of the Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona Press, Tucson. 80 pp.
- Shultz, E. F. 1973. Problems in Applied Hydrology. Water Resources Publications. 501 pp.
- Sellers, W. 1975. Physical Climatology. The University of Chicago Press. Chicago, U.S.A. 272 pp.
- Sellers, H. A., and K. McGuffie. 1987. A climate Modeling Primer. Department of Geogrophy. University of Liverpool. Jhon Willey & Sons. 217
- Singh, V. P. 1996. Kninematic wave modeling in water resources. Surface Water hydrology. John Wiley & Sons, Inc. 357 pp.
- Singh, V. P. and B. Kumar. Surface Water Hydrology. 1993. Proceedings of the international conference on hydrology and water resources, Singh, V. P. and B. Kumar eds. New Delhi, India.
- Singh, V. P. 1992. Hydrologic Systems. Vol. II. Watershed Modeling. Prentice Hall. 320 pp.
- Skogerboe, G., 1981. International Course on Crop Water Function Production. Department of Agriculture and Irrigation Engineering. Utah State University.

- Smith, M. B. 1993. A GIS-Based distributed parameter hydrologic model for urban areas. *Hydrological Processes*, Vol. 7, 45-61
- Software Solutions. 2005. <http://www.jogsoftware.com/gis/index.html>
- Sombroek. W. G., and R. Gommers. 1996. The Climate Change –Agriculture conundrum. In *Global Climate Change and Agricultural Production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes*. FAO, John Willwy & Sons.
- Stone, J.J., L.J. Lane, and E. D. Shirley. 1992. Infiltration and runoff simulation on a plane. *Transactions of the ASAE*. 5(1) :161-170.
- Stuart, N. and C. Stoks. 1993. Hydrological modelling within GIS: an integrated approach. *In Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management. Proceedings of an international conference*. Vienna, Austria.
- Sweeney, T. L., D. L. Fread, and K. P. Georgakakos. 1993. Gis application for NWS Flash flood guidance model. *In Proceedings of the Federal Interagency Workshop on Hydrologic Modeling Demands for the 90's*. 5-95 - 5-101.
- Tiscareño, M., V. L. Lopez, J.J. Stone, and L. J. Lane. 1994. Sensitivity Analysis of the WEPP Watershed Model for Rangeland Applications: II Channel Processes. *Transactions of the ASAE*. Vol. 37, No. 1. pp 151 - 158
- Tiscareño, M., V. L. Lopez, J.J. Stone and L.J. Lane. 1993. Sensitivity Analysis of the WEPP Watershed Model for Rangeland Applications: I Hillslope Processes. *Transactions of the ASAE*. Vol. 36, No. 6. pp 1659 – 1672.
- Turban, E. and J.E. Aronson. 2000. *Decision support systems and intelligent systems*. 6th ed. (Available online at <http://cwx.prenhall.com/bookbind/pubbooks/turban2/>) Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- U.C. Sensus Bureau.2005. World Population Projection. <http://www.census.gov/ipc/www/idbnew.html>
- USGS. 2004. *Geographic Information Systems*. U. S. Department of the Interior. U. S. Geological Survey. [http:// mac.usgs.gov/isb/pubs/gis_poster/index.html](http://mac.usgs.gov/isb/pubs/gis_poster/index.html)
- USSD. 2003. *Planning Processes for the Development of Dams and Reservoirs. Public Involvement and Alternatives Analyses: A framework for Successful Decision Making*.
- Velazco – Molina H., Carmona – Ruiz, M. 1980. Cosecha de agua de lluvia para consumo humano, consumo pecuario y agricultura de secano. Primer reporte de evaluación. CONAZA. Monterrey, N. L. México. 33 p.

- Villanueva D. J. 1985. Determinación de la relación área de siembra área de escurrimiento para cultivos temporales en el altiplano Potosino. Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey N. L. México.
- Villanueva, D. J., J. Cerano P., D. W. Stahle, M.D. Therrel, D. K. Cleaveland y Sánchez – Cohen I. 2004. Elementos Básicos de la Dendrocoronología y sus aplicaciones en México. INIFAP CENID RASPA. Folleto Técnico No. 2. 36 pp.
- Wackernagel, M., and W. Rees. 1996. Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact on Earth. The New Catalyst Bioregional Series. 160 pp.
- Webster. 1994. Webster Ninth New College Dictionary. Springfield, Mass.: Merriam-Webster.
- Wilks, D. S. 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Department of Soil Crop and Atmospheric Sciences. Academic Press. Ithaca New York. 467 pp.
- Williams, J. R., Renard, K. G., and Dyke, P.T. 1983. A new method for assessing the effect of erosion on productivity-The epic model. Journal of soil water conservation.
- Wischmeier, W. H., and D. Smith. 1978. Predicting Soil Losses: A guide to conservation planning. USDA Agric. Handbook No. 537.
- World Water Resources Institute. 2003. World water resources 1992 – 1993. New York Oxford University Press. New York. U. S. A.
- Yakowitz, D.S., L.J. Lane, and F. Szidarovsky. 1993. Multi-attribute decision making: dominance with respect to an importance order of attributes. Applied Mathematics and Computation 54:167-181.
- Yakowitz, D.S., and M. Wetz. 1998. An algorithm for computing multiple attribute additive value measurement ranges under a hierarchy of the criteria: application to farm or rangeland management decisions. In Beinat E. And Nijkamp P. (ed) *Multicriteria Analysis for Land Use Management*. Kluwer Academic Publishers, 1998. Boston, pp 163 – 167.

