



# GESTIÓN ENTRÓPICA DEL AGUA EN PAÍSES DECENTRALIZADOS

(propuesta)

Dr. Carlos Díaz Delgado  
**Centro Interamericano de Recursos del Agua**  
**CIRA - U A E M**

*cdiaz@uaemex.mx*

*Julio 2008, Zaragoza, España*

Sede de la COORDINACIÓN GENERAL de la RED LERMA en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.



# Entorno (generalidades)



## Social

- ✓ Situación social propicia a conflictos por el agua;
- ✓ Alta vulnerabilidad ante fenómenos hidrocimatológicos extremos;
- ✓ Escasa participación social en la toma de decisiones = confrontación con autoridades;

## Ambiental

- ✓ Degradación creciente de ecosistemas;
- ✓ Deterioro en la calidad del agua superficial y riesgo de contaminación de acuíferos;
- ✓ Alteración del régimen hidrológico;

# Entorno (generalidades)



## Institucional


- ✓ Administración sectorizada y desarticulada;
- ✓ Visión corta, fragmentada y sin consenso;
- ✓ Intervenciones acotadas por periodos Mpal, Estatal y Federal;
- ✓ Falta de vinculación institucional en el diseño e implementación políticas públicas con una metodología integradora y estratégica.

## Científico - Académico


- ✓ Desarticulación ente gobiernos y cuerpos académicos;
- ✓ Esfuerzos individuales y aislados;
- ✓ Poca difusión y discusión de resultados y tecnologías.
- ✓ La investigación y su relación con las prioridades del socioecosistema es discutible.
- ✓ Falta un enfoque con metas y objetivos que redunde en beneficios tangibles para la sociedad.






## Planeación estratégica



Proceso de desarrollo intuitivo y analítico continuo con un enfoque integrado que cuente con la participación de involucrados para:



- ✓ Definición de perspectivas comunes;
  - ✓ Identificación de posiciones deseadas o necesarias;
  - ✓ Establecimiento de condiciones de rendimiento;
  - ✓ Implementación de un plan eficiente, oportuno y eficaz.
- 
- 
- 

# ENFOQUE GIRH



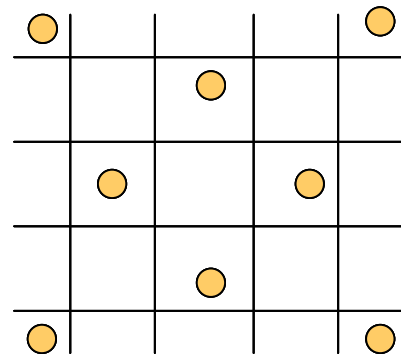
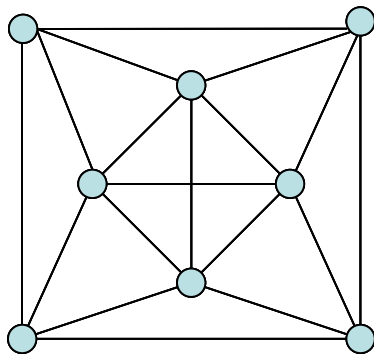
Es un **proceso** sistemático para el desarrollo, asignación y monitoreo del **recurso hídrico** y sus **usos**, en el contexto de objetivos **sociales**, **económicos** y **ambientales**.



NATURALEZA:

ADMINISTRACIÓN  
TRADICIONAL:

GIRH:



Supone todos los usos como **interdependientes**, por lo que atiende los **efectos** de cada uno de los usos sobre los otros.







En el marco de propuestas para la implementación de mejores prácticas de gestión hídrica en países descentralizados, se presenta la teoría de la gestión entrópica del agua (Díaz-Delgado et al., 2005).

1. Esta propuesta pretende mostrar una metodología con base en hechos reales, físicos y naturales,
2. Orienta la toma de decisiones en materia de gestión de agua evadiendo las tentaciones de una manipulación económica a través de subsidios que vuelvan ficticio todo esfuerzo de optimización del sistema.



✓ Atribuir valor a los recursos naturales es una tarea ardua y difícil.



✓ La medida que se utiliza generalmente para su ponderación es de tipo monetaria y el dinero y la naturaleza se gobiernan por distintas leyes.



✓ El dinero se rige por las leyes de las matemáticas y la naturaleza por las leyes de la física.



✓ La matemática permite que las cantidades se incrementen de acuerdo con la regla del interés compuesto.



✓ La física está regida por la segunda ley de la termodinámica: la degradación entrópica.





✓ La cantidad de agua que existe en la Tierra se mantiene relativamente estable.



✓ En los hechos, las cantidades disponibles son mucho menores. En primer lugar, porque la función natural de las aguas no es uso exclusivo de los humanos.



✓ Por esa razón, el uso de agua está limitado por las necesidades de las configuraciones específicas de los ecosistemas locales, regionales y globales.



✓ Los procesos de tratamiento se realizan utilizando combustibles fósiles.(energía solar acumulada y finita).



✓ En general, lo que da valor al agua es sobre todo su calidad.





# Justificación de un instrumento de análisis entrópico del agua



✓ En materia hídrica, las decisiones finales suelen ser de tipo político, y en la mayor parte de los casos de orden económico.



✓ desafortunadamente, la evaluación del “valor” del agua toma en cuenta solamente los aspectos monetarios.



✓ Erróneamente se considera que el agua es un recurso inagotable, bastando construir suficientes bienes de capital (presas o pozos) para obtenerla.



✓ En realidad, se desconoce la pérdida de valor resultante de su utilización, y por ende del costo, requerido para devolverle a un valor que permita su reutilización.



✓ En la medida que se pueda asignar un valor “natural” al agua, más fácil será realizar un análisis y toma de decisión sobre bases ciertas y firmes.



# El concepto de entropía



✓ La entropía es un concepto complejo, que busca describir la dirección natural de los procesos físicos en el universo. Éstos tienden a darse desde ordenado a lo desordenado, de lo heterogéneo a lo homogéneo.



✓ El volumen de agua del planeta es finito pero su potencial teórico para el uso es ilimitado.



✓ Lo que en verdad está acotado es la rapidez del flujo y depende de la energía (prácticamente suministrada por radiación solar).



✓ Otro limitante a largo plazo es la irreversibilidad final de su degradación entrópica, que si bien se expresa sobre todo a escalas temporales muy grandes, puede ser acelerada a través de la intervención humana.



# El valor entrópico del agua



✓ El valor entrópico está dado por la energía requerida para obtener una determinada calidad de agua a partir de un nivel de referencia.



✓ En los sistemas naturales el mayor valor entrópico se logra a partir de la condensación del vapor de agua de la atmósfera en las nubes y su precipitación.



✓ La caída del agua, tanto como su escurrimiento posterior rumbo a niveles menores de energía potencial, implica un aumento de la entropía y por ende una pérdida del valor entrópico del recurso.



✓ Por otro lado, el uso humano del agua es un factor que acelera el deterioro creciente de su valor, que se agrega a la degradación debida a procesos naturales.



# El valor entrópico del agua



✓ La agricultura de irrigación, uso hídrico mayor, utiliza aguas de excelente calidad y las regresa al medio natural con una calidad mucho menor.



✓ Las ciudades, consume menos agua que la agricultura, pero tienden a ser grandes degradadoras del agua.



✓ Las actividades industriales tienen en general intensos efectos nocivos sobre los recursos hídricos.



✓ Los procesos de depuración del agua dan lugar a un aumento temporal del valor entrópico que la hacen apta para ser utilizada con el fin propuesto.



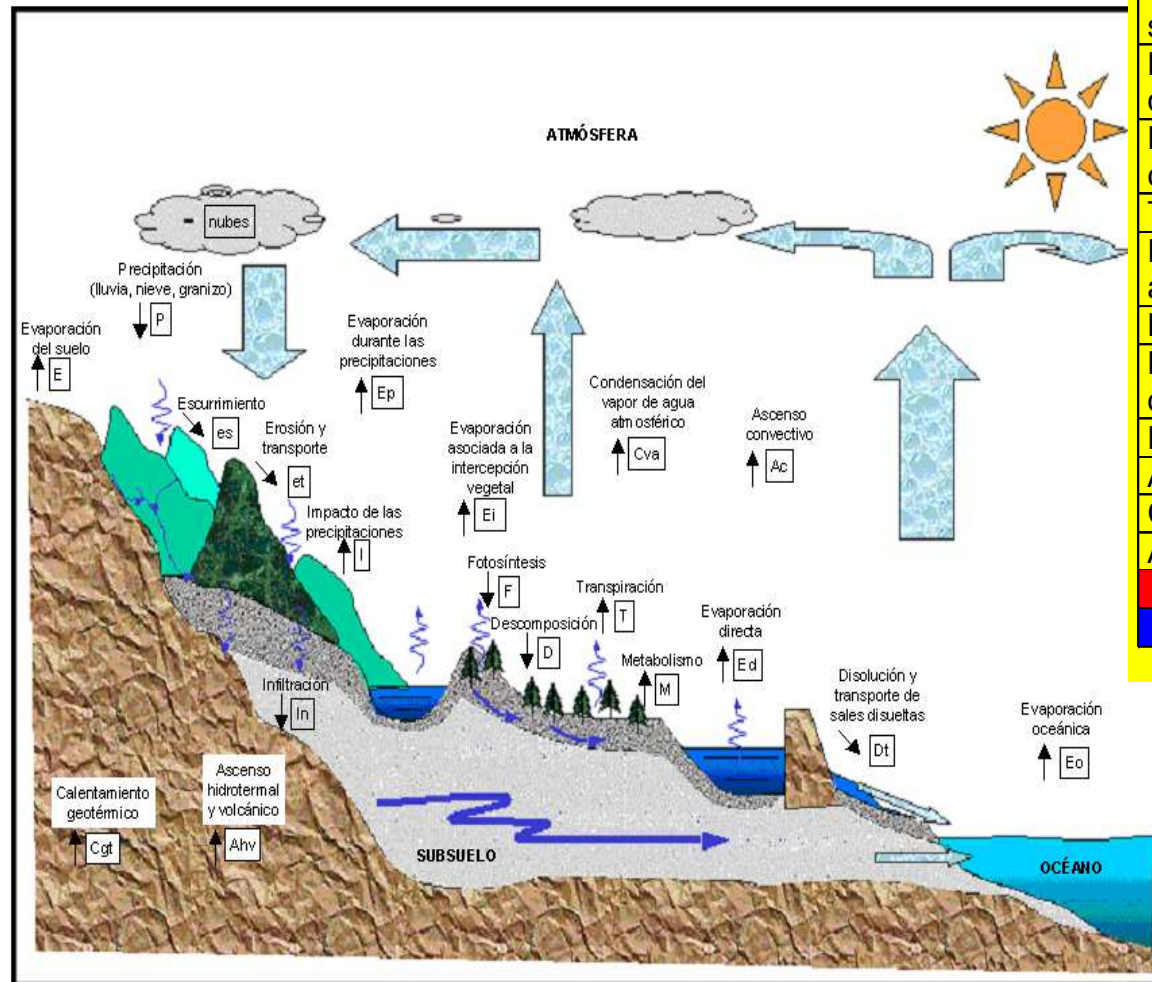


# Ciclo energético-hidrológico del agua

Tabla 2. Lista de fenómenos y procesos del ciclo energético

Fenómenos y procesos	Símbolo
Condensación del vapor de agua atmosférico	Cva
Caída de precipitaciones	P
Evaporación durante la caída	Ep
Impacto de las precipitaciones	I
Evaporación asociada a la interceptación vegetal	Ei
Infiltración	In
Escurrimiento	es
Erosión y transporte de materiales en suspensión	et
Disolución y transporte de sales disueltas	Dt
Evaporación directa de las aguas continentales	Ed
Transpiración (biológica)	T
Fotosíntesis (desarrollo organismos autótrofos)	F
Metabolismo de organismos autótrofos	M
Descomposición y metabolismo de organismos heterótrofos	D
Evaporación oceánica	Eo
Ascenso convectivo	Ac
Calentamiento geotérmico	Cgt
Ascenso hidrotermal y volcánico	Ahv

█ Absorbe energía  
█ Libera energía





# Criterios de clasificación



Para clasificar el agua por su valor entrópico se usan los siguientes criterios:



■ El valor entrópico tiende a declinar a medida que el agua desciende, liberando energía potencial.



■ También disminuye al incrementarse la concentración de sustancias disueltas.



■ El valor entrópico baja al aumentar los organismos heterótrofos y al aumentar la concentración de materia orgánica.



■ El valor entrópico desciende al crecer la contaminación de las aguas.



■ Puede haber aguas con características muy diferentes que estén clasificadas en el mismo nivel (requieren cantidades comparables de energía para su tratamiento).



# Criterios de clasificación

Nivel entrópico	Aguas naturales		Utilización del agua natural	Aguas residuales o contaminadas	Posición geológica	Presencia de vida
	Aguas superficiales, atmosféricas	Aguas subterráneas				
10	Nubes altas, recién condensadas		Agua destilada		Atmosférica, elevada	Organismos muy escasos, pocos nutrientes
9	Nubes bajas, lluvia, nieve		Agua potable		Atmosférica, baja	Organismos escasos, pocos nutrientes
8						
7	Manantiales, torrentes de montañas		Aguas termales		Cimas, cabeceras valles	Organismos de abundancia escasa a intermedia
6	Cursos altos de ríos, lagos de montaña	Napas hipodérmicas de agua dulce	Aguas para riego	Lluvia moderadamente ácida	Zonas montañas, sierras, colinas elev., mesetas	Organismos de abundancia intermedia
5	Cursos medios de ríos, lagos medios, emisarios de ciertos humedales	Napas hipodérmicas, acuíferos poco profundos no contaminados	Aguas para riego	Lluvia muy ácida	Zonas de colinas, sierras bajas, subsuelo de poca profundidad	Organismos abundantes



# Criterios de clasificación



Nivel entrópico	Aguas naturales		Utilización del agua natural	Aguas residuales o contaminadas	Posición geológica	Presencia de vida
	Aguas superficiales, atmosféricas	Aguas subterráneas				
4	Cursos bajos de río, lagos de llanura, humedales oxigenados	Agua subterránea profunda dulce. Poco profunda ligeramente salobre.	Aguas para riego	Drenajes de riego, agua residual tratada	Llanuras, colinas bajas subsuelo medianamente a muy profundo.	Organismos muy abundantes en ríos y lagos, localmente exceso de nutrientes. Vertidos de aguas de riego pueden provocar procesos de eutroficación.
3						
2	Lagos y humedales eutrofizados Lagos salobres	Agua subterránea profunda ligeramente salobre; aguas poco profundas salobres	Aguas para lavado	Drenajes de riego, agua residual parcialmente tratada	Zonas bajas, áridas, subsuelo de profundidad variable	Organismos muy abundantes en los lagos salobres. Los vertidos de aguas de riego pueden provocar procesos de eutroficación.
1						



# Criterios de clasificación



Nivel entrópico	Aguas naturales		Utilización del agua natural	Aguas residuales o contaminadas	Posición geológica	Presencia de vida
	Aguas superficiales, atmosféricas	Aguas subterráneas				
0	Mares y lagos salados	Agua subterránea salada.	Aguas balnearias	Vertidos urbanos e industriales medios	Nivel del mar, zonas continentales deprimidas, subsuelo de profundidad variable	Organismos muy abundantes en mares y lagos, escasos en vertidos urbanos. Los vertidos urbanos provocan frecuentes procesos de eutroficación.
0 a -5	Salmueras	Salmueras subterráneas	Producción de sal	Vertidos urbanos e industriales altamente contaminados	Salmueras subterráneas	Escasos organismos debido a la toxicidad, procesos de eutroficación posibles localmente
< -5	Salinas	Yacimientos de sal	Producción de sal industrial	Vertidos industriales de alta toxicidad	Yacimiento de sal	Ausencia de organismos



# Adjudicación de valor entrópico



$$VE = 1 - \left( \frac{10(10 - NE)^2}{Mc} \right)$$

**VE:** es valor entrópico;

**NE:** es el nivel entrópico;

**Mc:** son las megacalorías requeridas para evaporar 1 m<sup>3</sup> de agua a 15° C de temperatura y a la presión del nivel del mar.





# Adjudicación de valor entrópico



**Tabla 4 Valor entrópico correspondiente para cada nivel entrópico**

Nivel entrópico	Valor entrópico correspondiente
10	1.00
9	0.99
8	0.96
7	0.91
6	0.84
5	0.75
4	0.64
3	0.51
2	0.36
1	0.19
0	0
0 a -5	-0.21 a -2.25
< -5	< -2.25



# Parámetros para definir el nivel de valor entrópico



Los niveles de DBO admisibles (mg/l) se fijan de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas.



Para las aguas residuales de origen industrial, cuya toxicidad puede impedir la vida de los organismos, la DBO no es una medida adecuada y puede ser sustituido por la DQO.



En ciertas situaciones puede ser necesario agregar un parámetro adicional compuesto (metales y otros contaminantes: MOC, Tablas 5, 6, 7 y 8).



# Parámetros para definir el nivel de valor entrópico



Tabla 5. Límites permisibles de metales y otros contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (MOC, promedio diario, en mg/l);

Metales	Máximo tenor permitido (mg/l)
Zinc	9.0
Cobre	15.0
Cadmio	0.75
Cromo hexavalente	0.75
Plomo	1.5
Níquel total	6
Mercurio	0.015
<b>Otros contaminantes</b>	
Arsénico total	0.75
Cianuro total	1.5
Grasas y aceites	75

Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996



# Parámetros para definir el nivel de valor entrópico



Tabla 6. Límites permisibles de metales y otros contaminantes en las aguas residuales tratadas que se descarguen en ríos, para protección de la vida acuática (MOC, promedio diario, en mg/l);

Metales	Máximo tenor permitido (mg/l)
Zinc	20
Cobre	6
Cadmio	0.2
Cromo total	1
Plomo	0.4
Níquel total	4
Mercurio	0.01
<b>Otros contaminantes</b>	
Arsénico total	0.2
Cianuro total	2

Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996



# Parámetros para definir el nivel de valor entrópico



Tabla 7. Límites permisibles de metales y otros contaminantes para agua potable (MOC, ;promedio diario, en mg/l);

Metal	Máximo tenor permitido (mg/l)
Zinc	5.0
Cobre	2.0
Hierro	0.3
Aluminio	0.2
Manganeso	0.15
Cromo total	0.05
Plomo	0.025
Mercurio	0.001
<b>Otros contaminantes</b>	
Arsénico	0.05
Cianuros (CN-)	0.07
Nitratos (como N)	10.0
Nitritos (como N)	0.05
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001

Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994<sup>1</sup>





# Nivel entrópico de las aguas con base en DBO, DQO, SDT y MOC



Nivel entrópico	Aguas naturales superficiales		Aguas residuales o contaminadas				Aguas subterráneas	Salinidad ad TSD, ppm
	Tipo de agua superficial	DBO	Tipo agua residual	DBO*	DQO*	MOC Metales y otros contaminantes		
10	Nubes altas, recién condensadas	0						0-10
9	Nubes bajas, lluvia, nieve	0						10-40
8		0						40-80
7	Manantiales, torrentes de montaña	Hasta 10 mg/l				Por debajo de los límites establecidos en el nivel 7		80-150
6	Cursos altos de ríos, lagos de montaña	10-20 mg/l	Lluvia moderadamente ácida	0		Límites máximos para agua potable (Ver Tabla 5)	Napas hipodérmicas, manantiales de agua dulce	150-300
5	Cursos medios de ríos, lagos medios, emisarios de ciertos humedales	20-30 mg/l	Lluvia muy ácida	0		Concentraciones intermedias entre niveles 2 y 6	Agua subterránea poco profunda, dulce	300-600



# Nivel entrópico de las aguas con base en DBO, DQO, SDT y MOC

4	Cursos bajos de río, lagos de llanura, humedales oxigenados	30-45 mg/l	Drenajes de riego, agua residual tratada			Concentración intermedia entre niveles 4 y 7		
3		45-60 mg/l		0-60 mg/l	0-120 mg/l		Agua subterránea poco profunda, ligeramente salobre; agua subterránea profunda dulce	600-1000
2	Lagos y humedales eutrofizados Lagos débilmente salobres	60-80 mg/l	Drenajes de riego, agua residual parcialmente tratada	60-80 mg/l	120-160 mg/l	Límites máximos para descargas en ríos (Ver Tabla 6) <sup>i</sup>	Agua subterránea profunda ligeramente salobre; aguas poco profundas salobres	1000-2500
1								2500-5000
0	Lagos salobres y mares	Menos de 60 Mg/l	Vertidos urbanos e industriales medios	80-200 mg/l	160-400 mg/l	Concentración intermedia entre niveles 2 y 4	Agua subterránea salada	5000-35000
0 a -5	Salmueras	0	Vertido urbano e industrial altamente contaminado	Más de 200 mg/l	Más de 400 mg/l	Límites máximos descargas alcantarillas, Ver Tabla 7	Salmueras subterráneas	35000-300000
< -5	Salinas	0	Vertidos industriales de alta toxicidad			Por encima del límite establecido en nivel 2	Yacimientos de Sal	Más de 300000

\* para efectos meramente estimativos se estableció que DBO/ DQO = 0.5

# Relación aproximada entre nivel entrópico, DBO y DQO



**Tabla 9. Valor entrópico, DBO y DQO.**

Nivel entrópico	Valor entrópico	DBO Aguas naturales	DBO Aguas residuales	DQO Aguas residuales
10	1.00	0	Niveles 4 a 10 no corresponden a aguas residuales	Niveles de 4 a 10 no corresponden a aguas residuales
9	0.99	0		
8	0.96	0		
7	0.91	Hasta 10 mg/l		
6	0.84	10-20 mg/l		
5	0.75	20-30 mg/l		
4	0.64	30-45 mg/l		
3	0.51	45-60 mg/l	0-60 mg/l	0-120 mg/l
2	0.36	60-70	60-70 mg/l	120-140 mg/l
1	0.19	70-80	70-80 mg/l	140-160 mg/l
0	0	Menos de 80 mg/l	80-200 mg/l	160-400 mg/l
0 a -5	-0.21 a -2.25		Más de 200 mg/l	Más de 400 Mg/l
< -5	< -2.25	Tiende a 0	Tiende a 0	



# Costo del reciclado artificial



**Tabla 10. Costo aproximado para elevar el valor entrópico del agua**

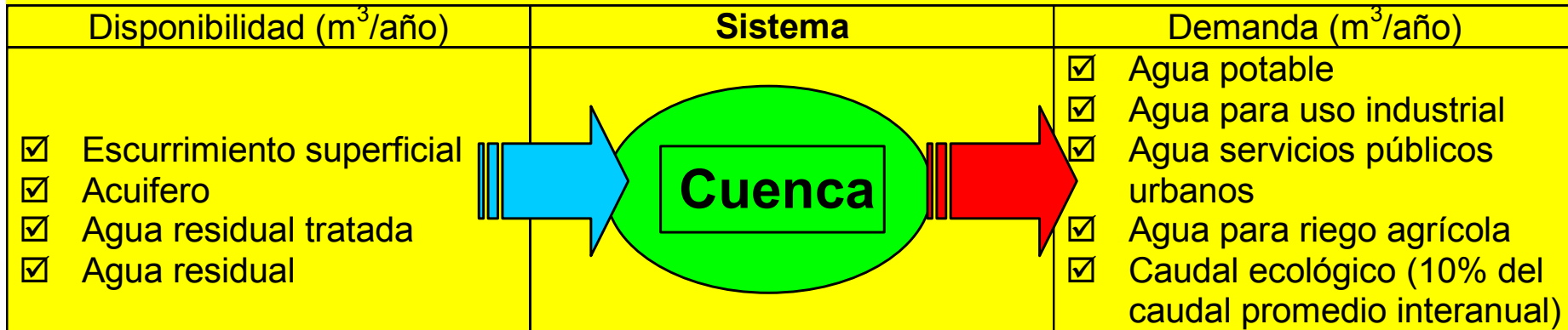
Nivel entrópico	Valor entrópico	Para elevar del nivel correspondiente al nivel 8 (potable) (varios métodos)	Métodos bioquímicos para elevar del nivel correspondiente a un nivel 5 (para riego)	Métodos biológicos para elevar del nivel correspondiente a un nivel 5 (para riego)
		<i>Costo aproximado por m<sup>3</sup> en U\$S</i>	<i>Costo aproximado por m<sup>3</sup> en U\$S</i>	<i>Costo aproximado por m<sup>3</sup> en U\$S</i>
10	1.00			
9	0.99			
8	0.96			
7	0.91	Menos de 0.05		
6	0.84	0.05-0.3		
5	0.75	0.1 a 0.5		
4	0.64	0.2 a 1	0.01-0.10	
3	0.51	0.4 a 3	0.02-0.15	
2	0.36	1 a 10	0.03-0.20	0.005- 0.10
1	0.19		0.05-0.20	0.01- 0.20
0	0	3 a 30	0.10 a 0.5	
0 a -5	-0.21 a -2.25	Más de 30	0.5 a 10	
< -5	< -2.25		> (0.5 a 10)	



# Aplicación conceptual MEGICH



## Esquema de una cuenca





# Aplicación conceptual MEGICH

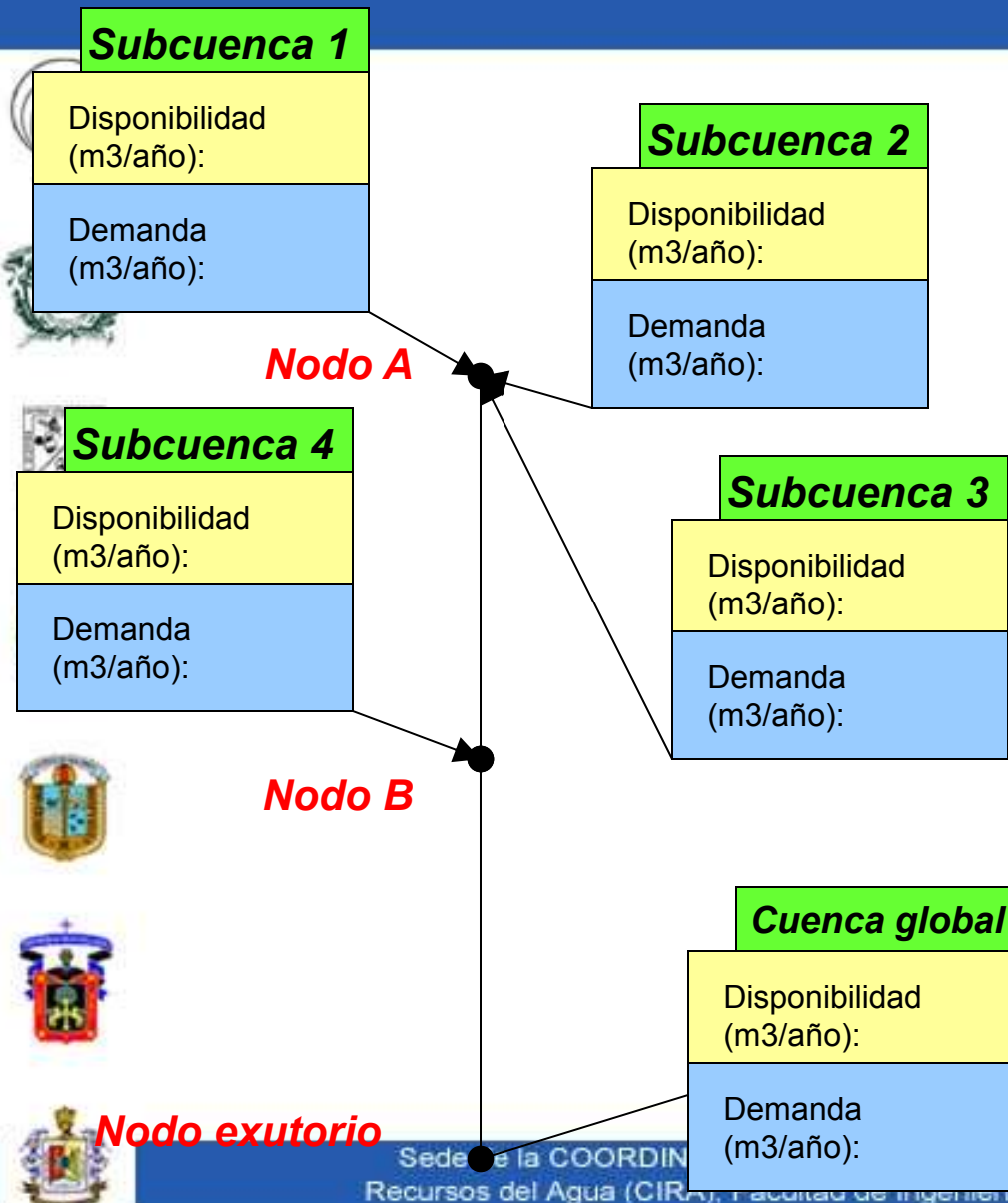


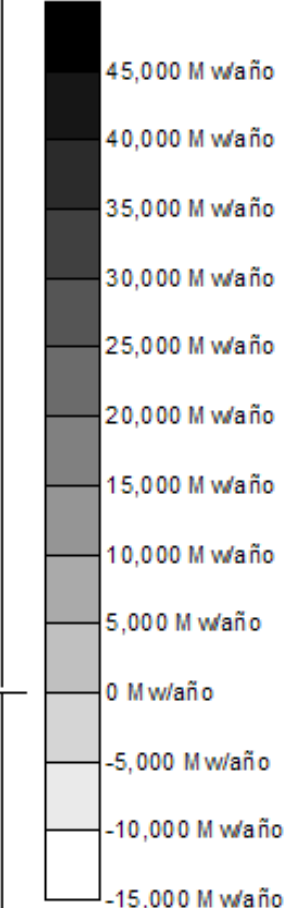
Diagrama de flujo de una cuenca hidrológica

# Aplicación conceptual MEGICH

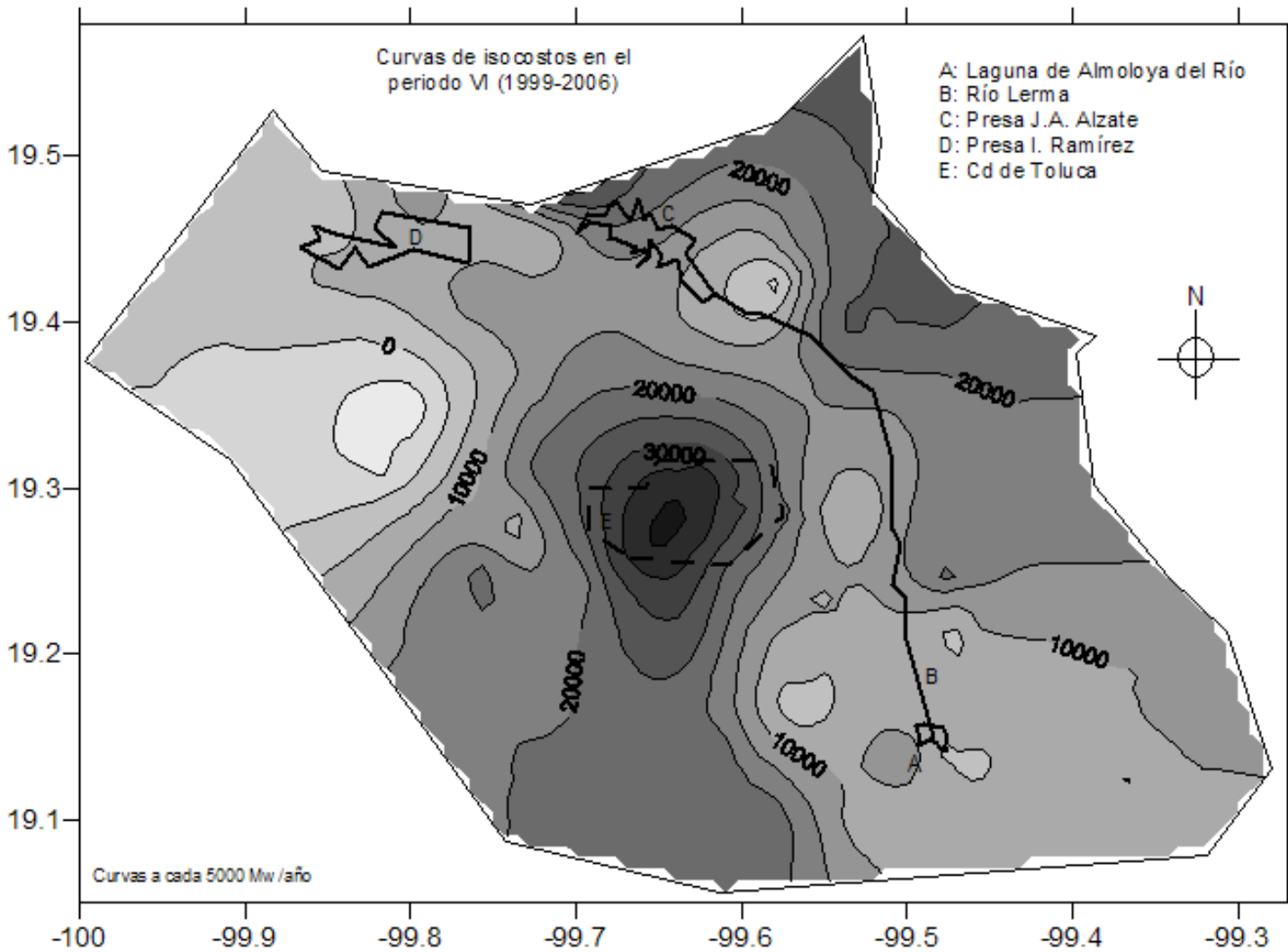


*No compromiso con el agua o con la vida!*

Consumo energético por descenso del nivel de agua subterránea



Ahorro energético por recarga al acuífero



Curvas de isocostos en el periodo VI (1999-2006)

- A: Laguna de Almoleya del Río
- B: Río Lerma
- C: Presa J.A. Alzate
- D: Presa I. Ramírez
- E: Cd de Toluca

Curvas a cada 5000 Mw/año



# Conclusiones



- ✓ La compleja problemática hídrica presente en la mayoría de los países en vías de desarrollo, así como la creciente escasez de energía fósil disponible, se han convertido en variables críticas de desarrollo de estos pueblos.
- ✓ Estos países caracterizados por la escasez de recursos hídricos, por el exceso o bien por su alta degradación, y en todos los casos con una inminente necesidad de coordinación y articulación intersectorial, social, científica y política para poder llevar a cabo una mejor toma de decisiones.
- ✓ No se trata de modificar la estructura sectorial existente, ni la división de poderes y responsabilidades, ni desaparecer instituciones, sino darles el sentido adecuado articulando esfuerzos, coordinando planes, programas, proyectos y acciones para maximizar los beneficios y bienestar social y ambiental con la menor inversión posible.

¡¡Gracias!!