



Universidad de los Andes

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Departamento de Ingeniería Industrial

CURSO INGENIEROS SIN FRONTERAS

Recursos Hídricos

Julio de 2010

Mario Díaz-Granados Ortiz

MÚLTIPLES VISIONES DEL AGUA

Ciencias ambientales:	ecosistemas, conservación de hábitats, vida salvaje, contaminación, salud pública, ...
Planeadores:	desarrollo regional, ordenamiento territorial, marco institucional, agua potable y saneamiento básico, prevención y de desastres, ...
Ingenieros:	cuencas hidrográficas, presas, derivaciones, túneles, canales, centrales, diques, acueductos, tuberías, plantas de tratamiento, contaminación, obras de control de crecientes, ...
Abogados:	derechos del agua, leyes, autoridades legales, definiciones legales, audiencias, demandas, ...
Economistas:	eficiencia económica, redistribución del ingreso, subsidios, políticas de precios, ...
Administradores: ... etc ...	tarifas, tasas de uso, tasas retributivas, operación de sistemas, ...





FACETAS DEL AGUA: RECURSO Y AMENAZA

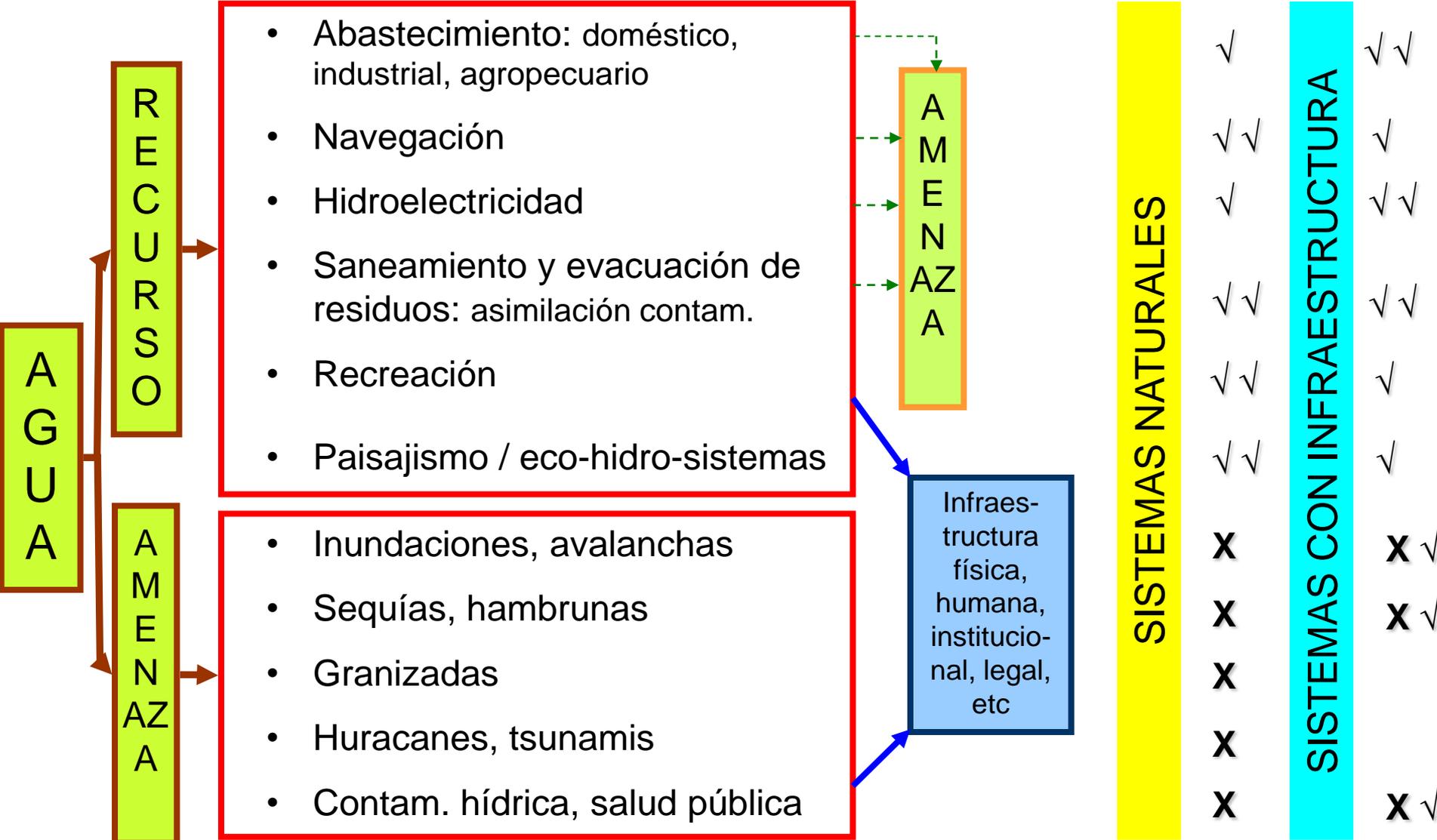


Imagen tomada de revista El Nuevo Correo, UNESCO, 2003



El Tiempo, 2002





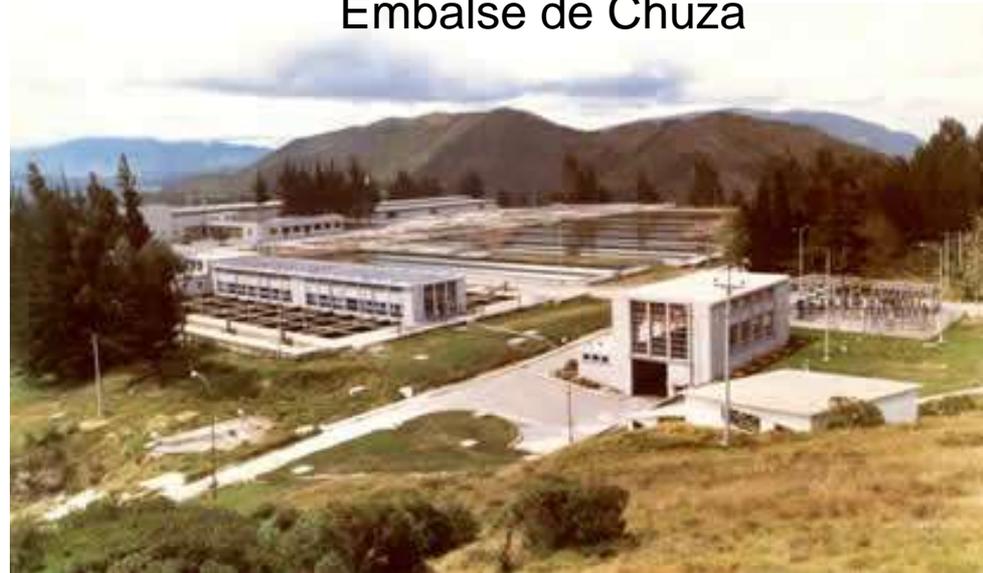


Páramo de Chingaza



Embalse de Chuza

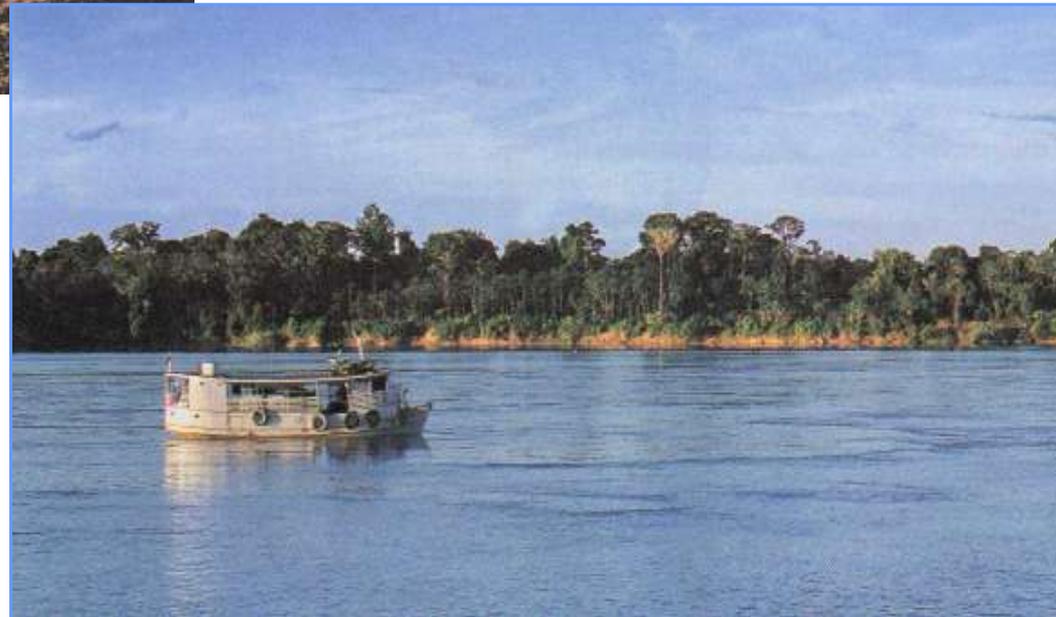
**AGUA
como
RECURSO**



Planta tratamiento de agua potable
de Tibitoc



Áreas agrícolas y control fluvial, Río Cauca



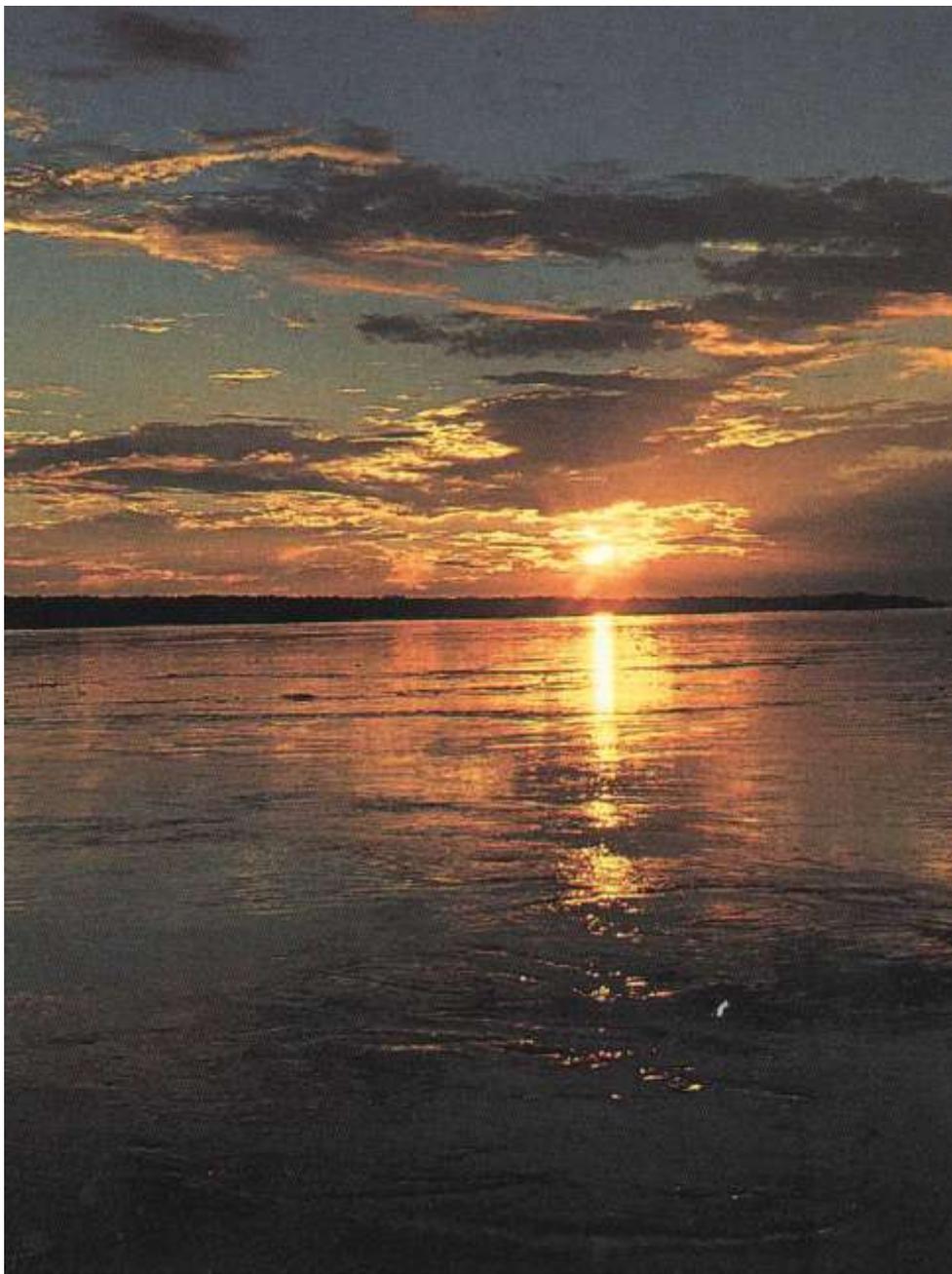
Navegación - Río Caquetá





Central hidroeléctrica de Guavio





RÍO AMAZONAS (Atardecer) - paisajismo





Río Fucha canalizado (Bogotá).
Nótese la condición y
contaminación ribereña

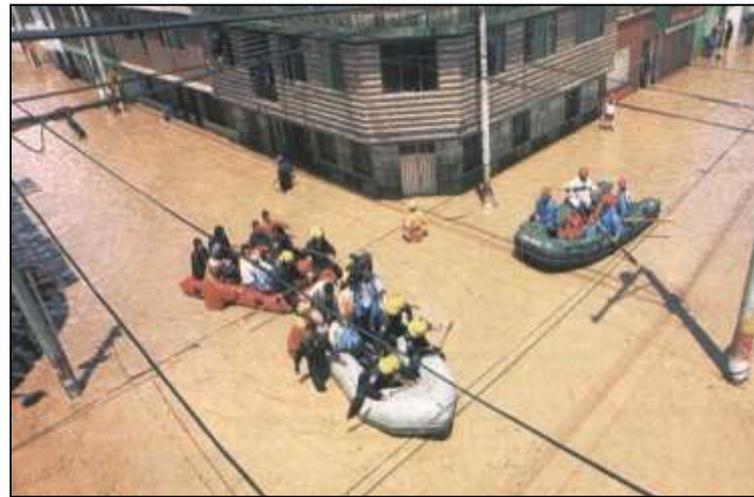
... y la ronda ????

Descargas de aguas residuales
vertiendo en la quebrada
Chiguaza (sur de Bogotá)



**AGUA
como
AMENAZA**





Inundaciones río Tunjuelo, 2002



Inundación río de Oro - Girón 2005





Rompimiento de presa
(Estados Unidos)

Altura presa aprox 30 m



Actualmente hay más de 1.000 millones de personas en todo el mundo sin acceso a agua potable.
(Informe PNUD, 2002)



Se estima que en 30 años más de 5.500 millones de personas vivirán en lugares con escasez de agua.

Cada día mueren 6000 niños en el mundo como consecuencia de enfermedades de origen hídrico



AGUA como RECURSO

- El agua es claramente diferente.
- Tiene características especiales que la diferencian de otros recursos o bienes.
- Retos importantes en su manejo y uso.

Características en términos de:

Demanda

Oferta

Actitudes sociales

Consideraciones legales y políticas



DEMANDA:

La sociedad obtiene diferentes beneficios del agua según su uso.

Beneficios del agua:

- (1) Beneficios como bien
- (2) Beneficios por asimilación de residuos
- (3) Valores públicos y privados por recreación y estética
- (4) Preservación de especies y ecosistemas
- (5) Valores sociales y culturales por no uso



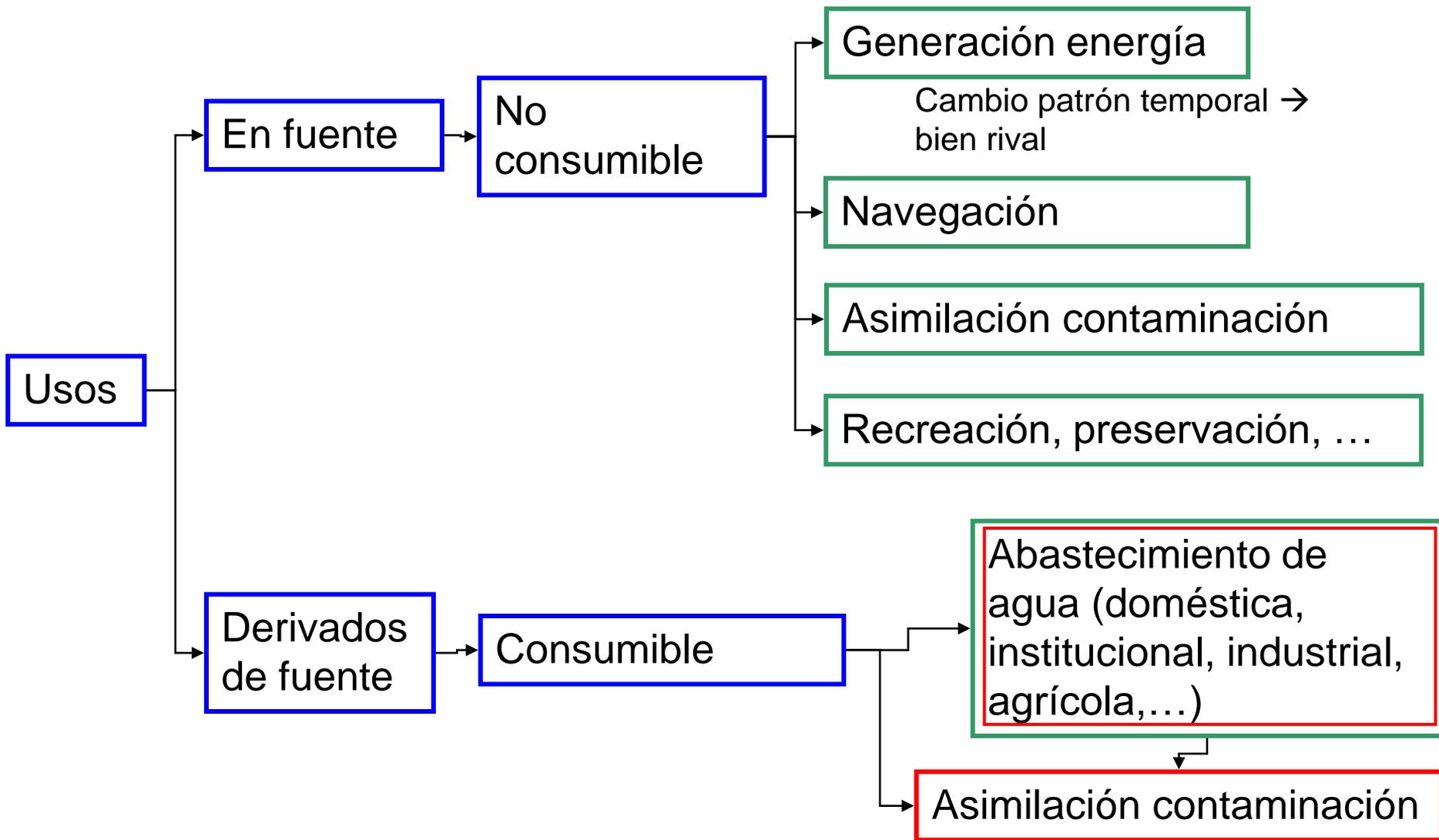
Dependiendo del uso, la demanda de agua varía entre un espectro continuo desde *bienes rivales* a *bienes no rivales*

Bien rival en consumo: si el uso de una persona evita o previene usos por parte de otros individuos. Típicamente estos bienes son los que se abastecen en procesos de mercados o cuasi mercados (a menudo se denominan *bienes privados*). Ejemplo: agua para uso doméstico, agrícola o industrial (priorización de estos usos)

Bien no rival en consumo: si el uso de una persona no anula su disfrute o su uso por otros (a menudo se denominan *bienes públicos o colectivos*). Ejemplo: valor estético de una bonita quebrada.

Dado que los que no pagan no pueden ser fácilmente excluidos, las firmas privadas no encontrarán rentable el abastecimiento de bienes no rivales





Uso consumible: el agua se consume (total o parcialmente) por parte de los usuarios. Definible en términos de **cantidad** y **calidad**.

Uso no consumible: el agua no se consume por parte de los usuarios



- (1) Beneficios como bien: beneficios derivados por beber agua, cocinar y por sanidad personal, así como también los beneficios asociados con actividades productivas agrícolas e industriales. Son bienes con características rivales pues el uso de una unidad de agua por una persona evita su uso por otras personas

Requerimientos mínimos de agua para las necesidades básicas del hombre:

Agua para beber:	5 litros/cápita-día
Servicios sanitarios:	20 litros/cápita-día
Baño:	15 litros/cápita-día
Preparación comida:	10 litros/cápita-día
Suma:	50 litros/cápita-día



NOTAS: valores para condiciones climáticas moderadas y niveles promedio de actividad

Dotación típica para Bogotá: 130 litros/cápita-día



Coberturas de servicio de acueducto en Colombia

<i>Cobertura del Servicio de Acueducto (censo nacional)</i>		
<i>%</i>		
<i>Años</i>	<i>Urbana</i>	<i>Rural</i>
1964	65.8	13.3
1973	86.9	22.7
1985	89.2	28
1993	94.6	41.1

Censos nacionales

<i>Acceso al Servicio de Acueducto</i>		
<i>%</i>		
<i>Años</i>	<i>Urbano</i>	<i>Rural</i>
1996	97.60	44.97
1997	97.72	44.79
1998	96.98	42.21
1999	98.24	42.87
2000	97.99	46.92
2001	98.76	47.29
2002	96.95	60.79
2003	97.56	61.00
2004	97.92	64.84

Encuesta Nacional de Hogares



- (2) Beneficios por asimilación de residuos: beneficios derivados por el transporte, dilución y degradación de residuos y contaminación. Esta capacidad de asimilación tiende a que el agua sea un bien público o colectivo, por la dificultad de excluir a los contaminadores de utilizar las corrientes. Sin embargo → tasas retributivas, etc

<i>Cobertura Censal del Servicio</i>		
	<i>%</i>	
<i>Años</i>	<i>Urbana</i>	<i>Rural</i>
1964	58	4.9
1973	72.2	6.7
1985	80.7	11.3
1993	81.8	14.4

<i>Cobertura del Servicio</i>	
<i>Años</i>	<i>Urbano</i>
	<i>%</i>
1990	72.1
1997	80.3
1999	81.8
2000	83.5

<i>Cobertura del Servicio Urbano por Grupos de Ciudades</i>			
	<i>%</i>		
<i>Años</i>	<i>G1</i>	<i>Ciudades > 100.000 hab</i>	<i>Municipios < 100.000 hab</i>
1990	86.9	74.8	51.4
1997	89.1	77.7	71.3
1999	92.4	84.2	67.9
2000	93.4	85.5	71.1

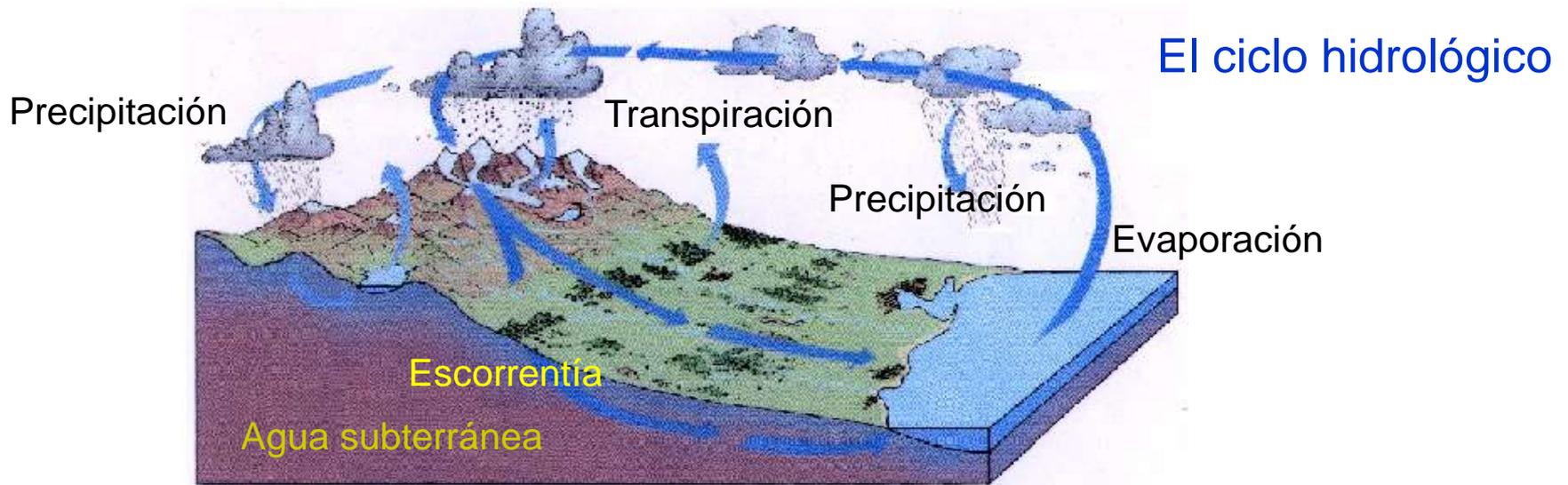
Coberturas de alcantarillado en Colombia



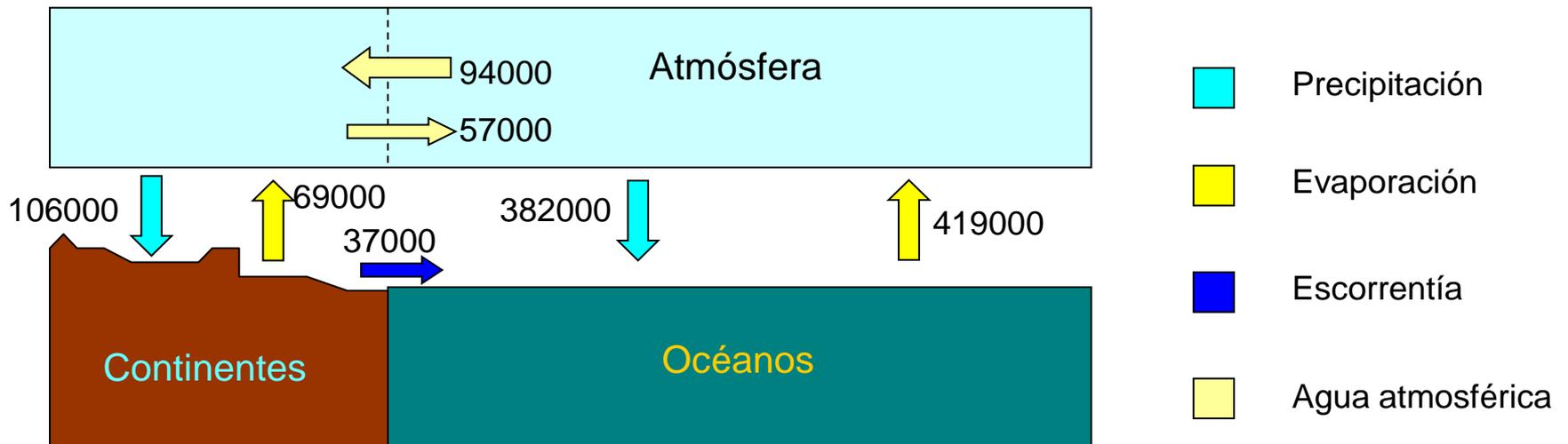
- (3 y 4) Beneficios por recreación, estética y preservación de ecosistemas: beneficios cada vez más importantes para la sociedad. Son beneficios que tienen tendencia a estar más hacia el extremo de bienes no rivales. Control estatal ambiental.
- (5) Valor por no uso: las personas pueden estar dispuestas a pagar por servicios ambientales que ellos nunca usarán. Son beneficios por saber que un bien existe aunque no pueden experimentarlo directamente. Legado a generaciones futuras.



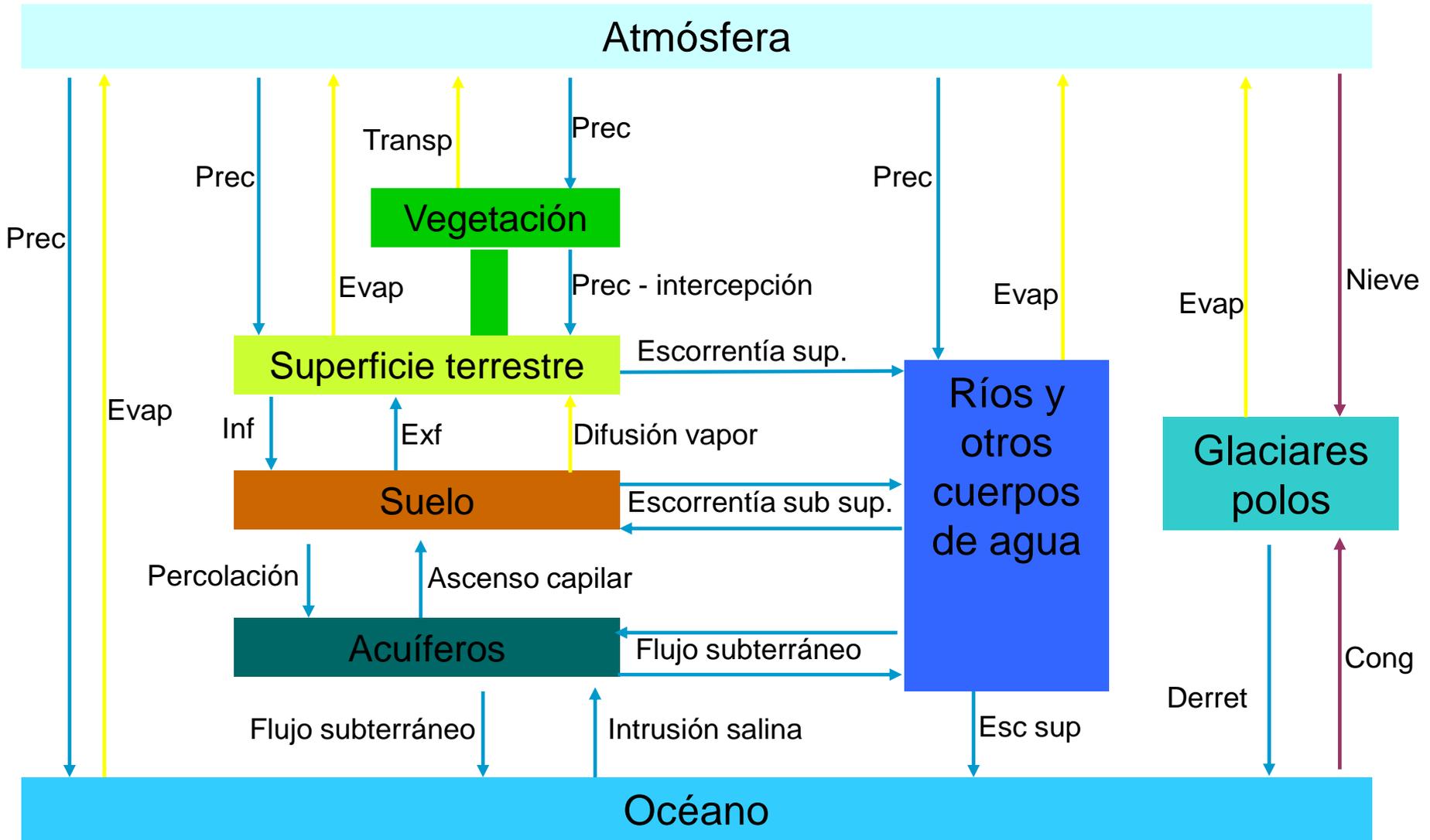
OFERTA:



Volúmenes de agua en un año típico (en giga-toneladas):



Ciclo hidrológico



Inventario de Aguas de la Tierra

Cuerpo de agua	Miles de km³	%
Lagos agua dulce	125	
Ríos	1.25	
Humedad del suelo	65	
Agua subterránea	8250	0.62
Lagos salados y mares interiores	105	0.008
Atmósfera	13	0.001
Hielos polares, glaciales y nieves	29200	2.1
Mares y océanos	1320000	97.25
TOTAL	1360000	100

Agua fresca utilizable: 4 millones de km³ = 0.295% del total



En consecuencia la oferta hídrica se caracteriza por:

Movilidad:

- El agua se mueve dentro del ciclo hidrológico y experimenta cambios de estado.
- Su movilidad presenta problemas para identificar y medir cantidades específicas del recurso.
- Por esto entre otras cosas, el agua es a veces un recurso de alto costo de exclusión: cuando el servicio (uso del agua) existe para un usuario es difícil excluir a otros de éste.
- Esto implica que los derechos de propiedad exclusiva que son la base de una economía de mercado o intercambio son difíciles de establecer y reforzar.



Incertidumbre en la oferta:

- La oferta hídrica, aunque renovable generalmente, es típicamente variable e impredecible en tiempo, espacio y calidad.
- En un lugar específico la oferta cambia notoriamente a lo largo del año y sobre períodos de años.
- ¿Efecto de fenómenos macroclimáticos y de cambio climático global? → valores extremos (sequías e inundaciones)



Propiedades solventes:

- El agua es casi un solvente universal.
- Esto, junto con una oferta generosa en volumen, crea la capacidad para contener residuos y contaminantes para diluirlos, degradarlos y transportarlos aguas abajo.
- El manejo de la capacidad asimilativa del sistema hidrológico es usualmente entendido como el manejo de un *bien público*.
- Progresivamente, las consideraciones de la calidad del agua han incrementado su importancia en relación con el uso directo y otros beneficios públicos



Interdependencia entre usuarios: la naturaleza física del agua combinada con la variabilidad de la oferta causa una interrelación única e impredecible entre usuarios

- El agua es raramente consumida completamente en el uso doméstico y de producción, sino que hay flujos de retorno al subsuelo o a corrientes superficiales:
 - En riego de cultivos no es inusual encontrar flujos de retorno del 50% del caudal derivado.
 - En abastecimiento de agua municipal doméstica es del orden de 80%.
- Los usuarios de aguas abajo se ven afectados (positiva o negativamente !!!) por la cantidad, calidad y distribución temporal de estos caudales que vienen de los usuarios de aguas arriba.
- Esto lleva a lo que se denomina externalidades que son efectos laterales no compensados de actividades individuales. En estos casos los costos totales de la actividad económica no están siendo reconocidos en las decisiones individuales de producción o consumo.



Problemas hídricos específicos del lugar:

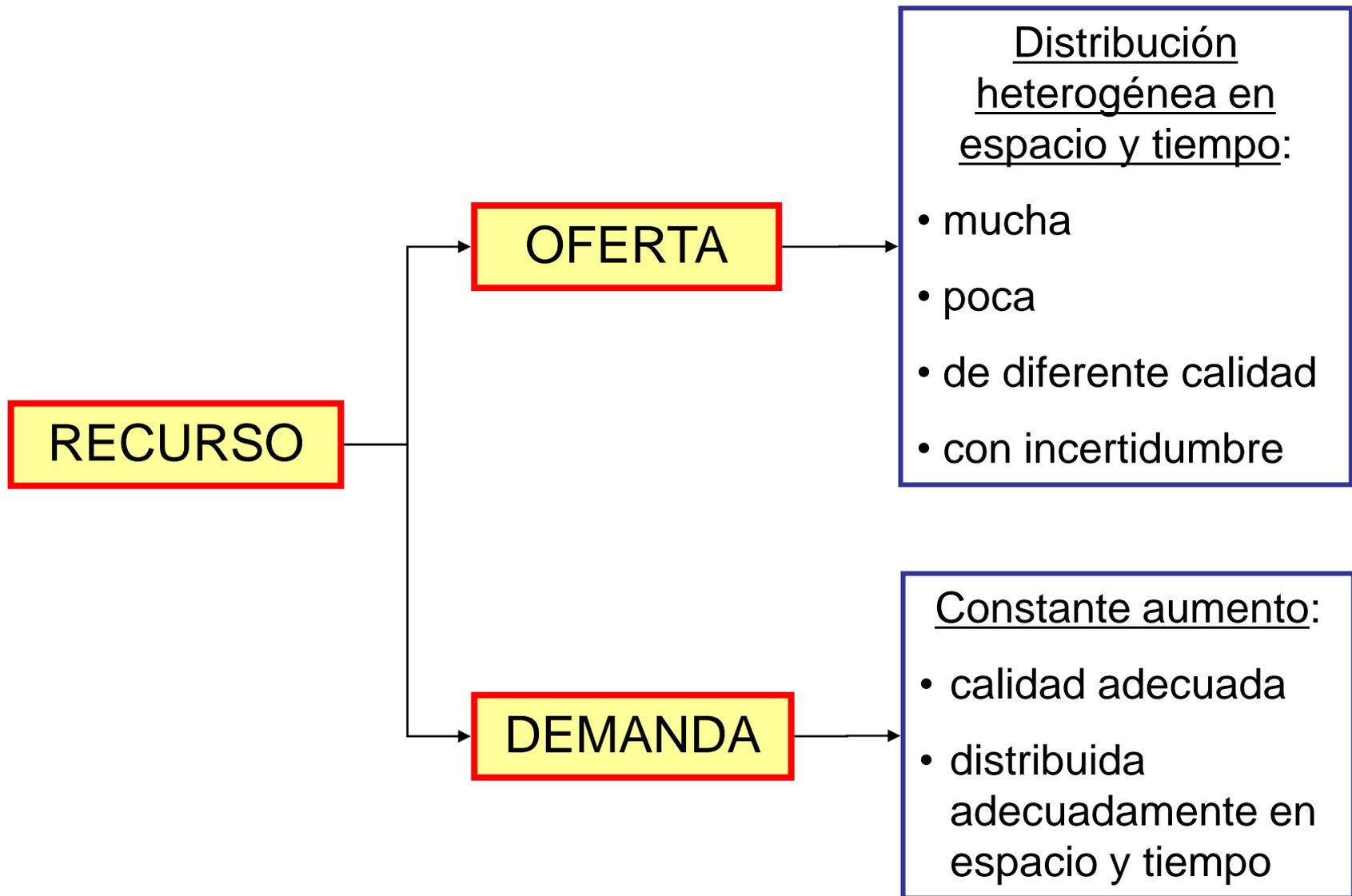
- Debido a la variaciones en la oferta hídrica y a consideraciones propias de demanda, los problemas con los recursos hídricos son típicamente dependientes del lugar específico.
- Entonces, el manejo de los problemas de agua tiende a ser específico de áreas dadas y su solución debe ser adaptada a las condiciones locales.
- Conclusión de esto es que no se puede generalizar.



Economías de Escala:

- La captación, almacenamiento y distribución de agua (especialmente de agua superficial) exhiben economías de escala.
- Cuando el costo marginal disminuye dentro del rango de demandas existentes, entonces una sola entidad abastecedora tiende a ser la estructura organizacional económicamente más eficiente.
- → Monopolio natural
- → Regulación del estado para evitar precios monopolísticos.





Variabilidad espacial y temporal

vs.

Demanda creciente del recurso

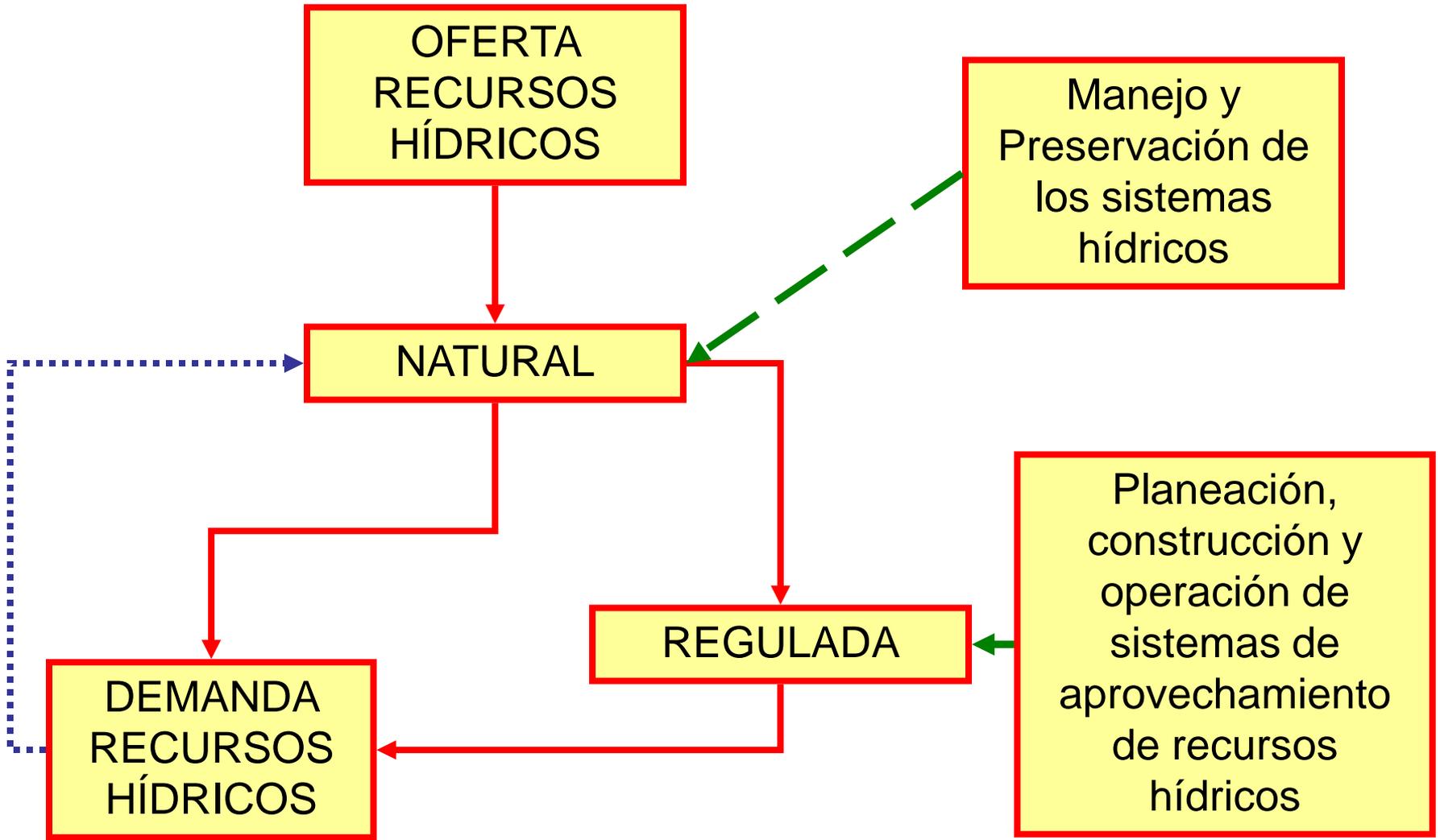
OJO

SOBRE-EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Eventual efecto de retroalimentación positiva

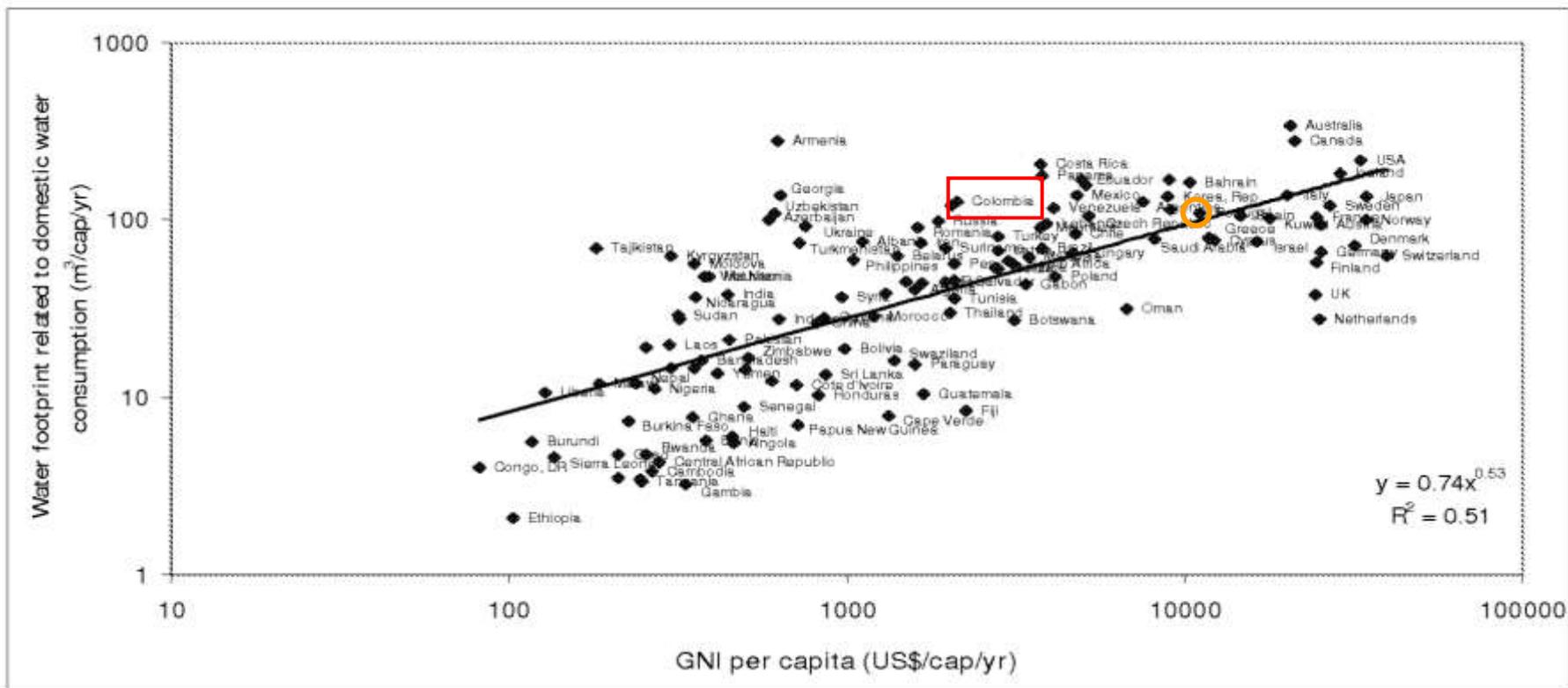
→ Desertificación





AGUA Y DESARROLLO:

Consumo agua doméstica vs. Producto interno bruto:

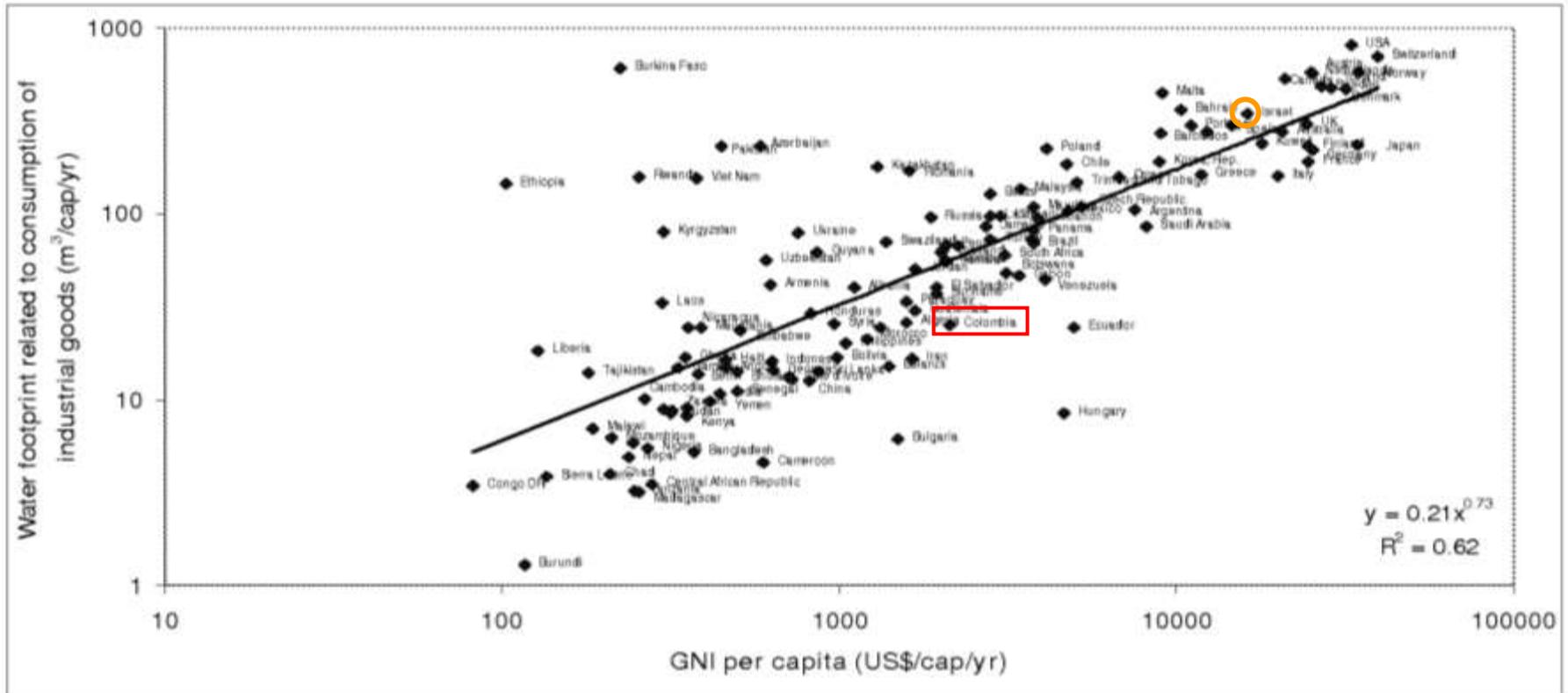


100 m³/cápita-año = 274 litros/cápita-día

Fuente: Water Footprints of Nations, Unesco-IHE, RRS No. 16, Nov. 2004



Consumo agua industrial vs. Producto interno bruto:



13 m³/cápita-año = 35.6 litros/cápita-día

Fuente: Water Footprints of Nations, Unesco-IHE, RRS No. 16, Nov. 2004



Etapas en Proyectos de Recursos Hidráulicos

<i>Etapa</i>	<i>Resultados</i>	<i>Imprevistos</i>	<i>Acciones</i>
<i>Identificación</i>	1	6	6
<i>Prefactibilidad</i>	2	5	5
<i>Factibilidad</i>	3	4	4
<i>Diseño</i>	4	3	3
<i>Construcción</i>	5	2	2
<i>Operación</i>	6	1	1

1 = general

1 = casi ninguno

1 = específica

6 = específico

6 = muchos

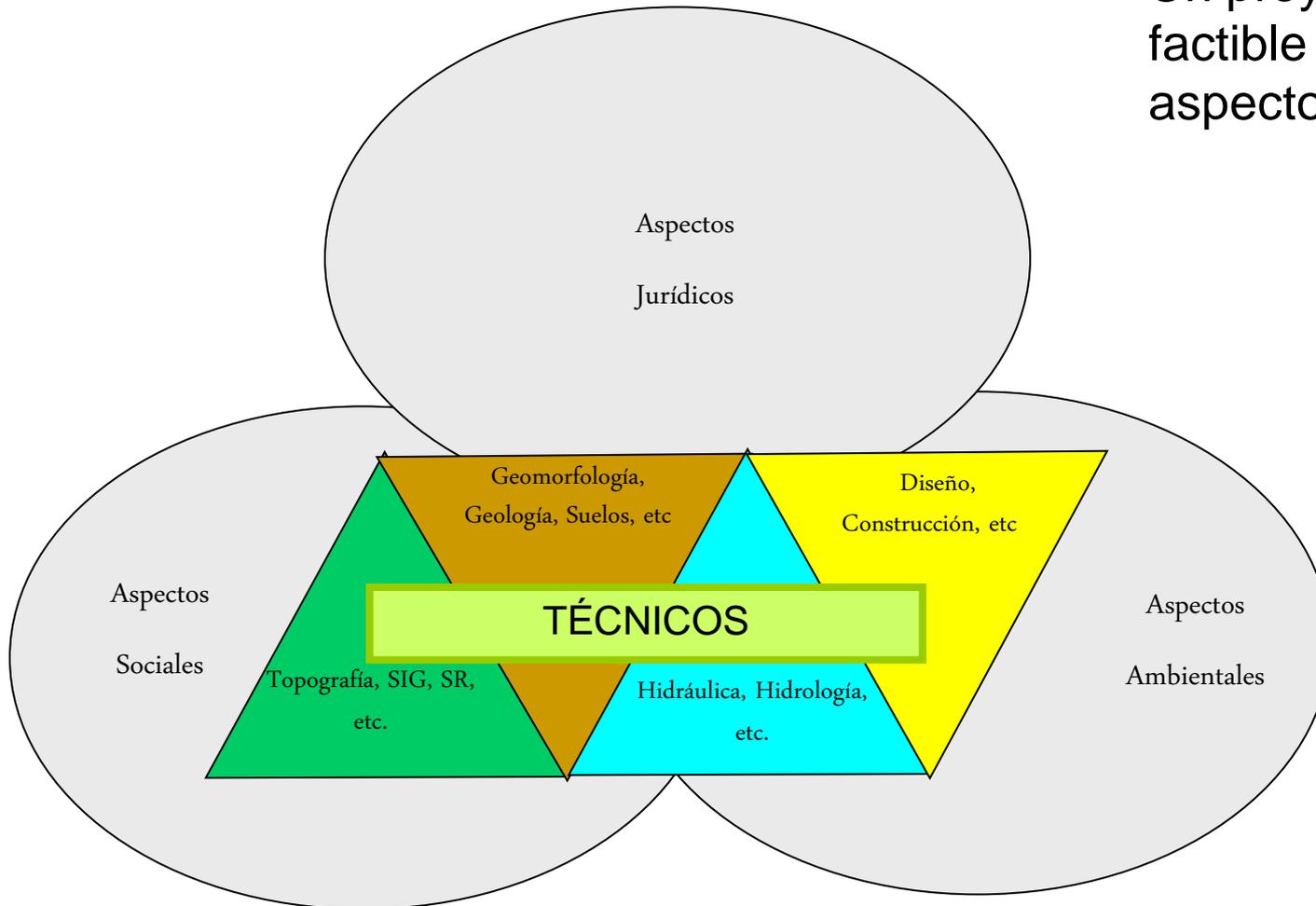
6 = muchas



Aspectos involucrados en los Proyectos

Un proyecto debe ser factible en varios aspectos:

- Técnicos
- Económicos
- Financieros
- Sociales
- Políticos
- Ambientales



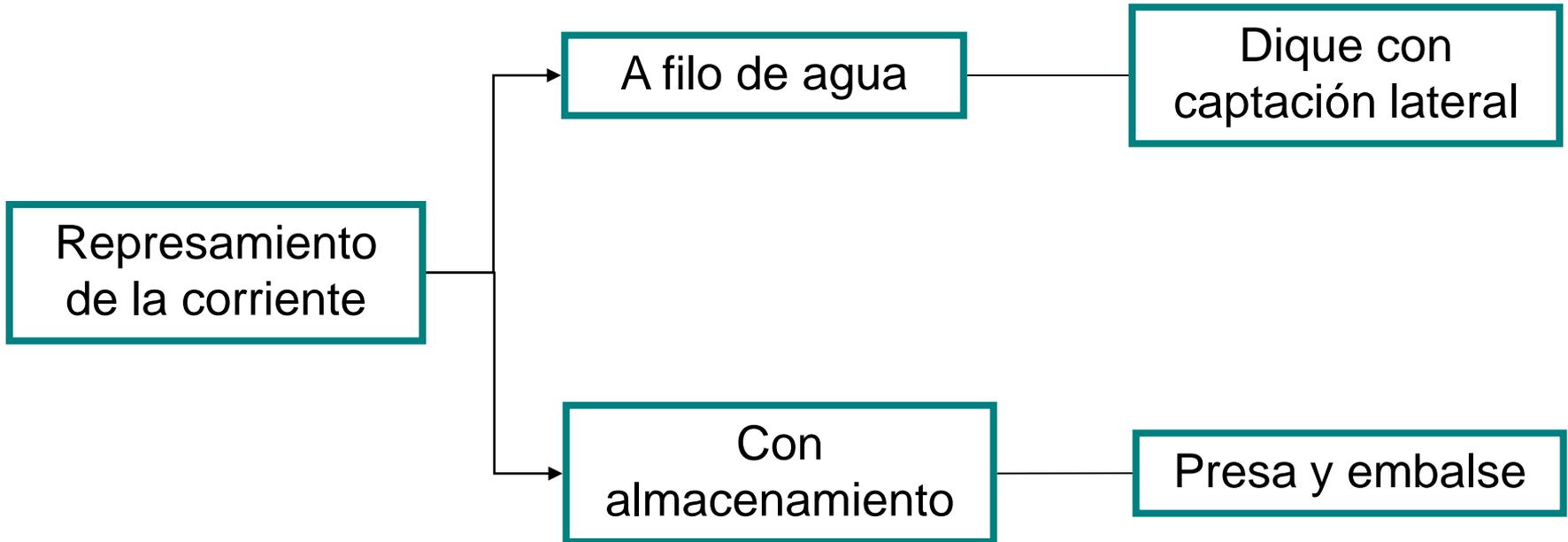
Propósitos de los Proyectos

- Abastecimiento de Agua
- Riego
- Energía
- Control de Inundaciones
- Saneamiento
- Drenaje
- Recreación
- Navegación
- Objetivo Múltiple

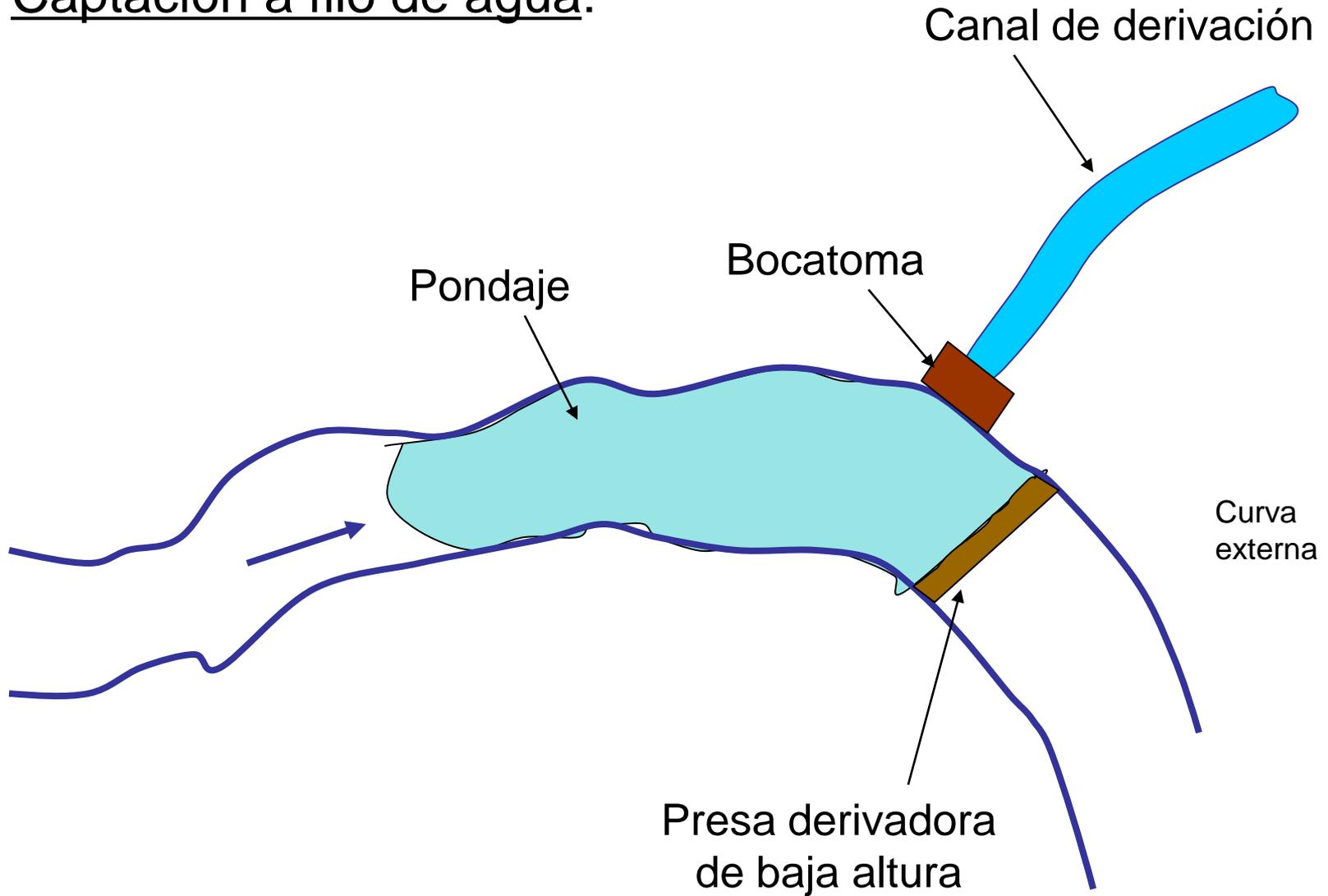


Captación

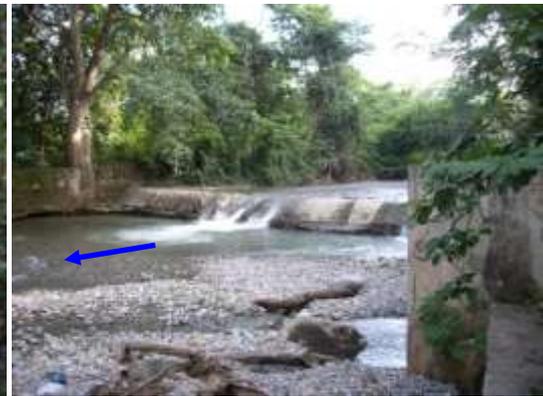
Aguas superficiales:



Captación a filo de agua:



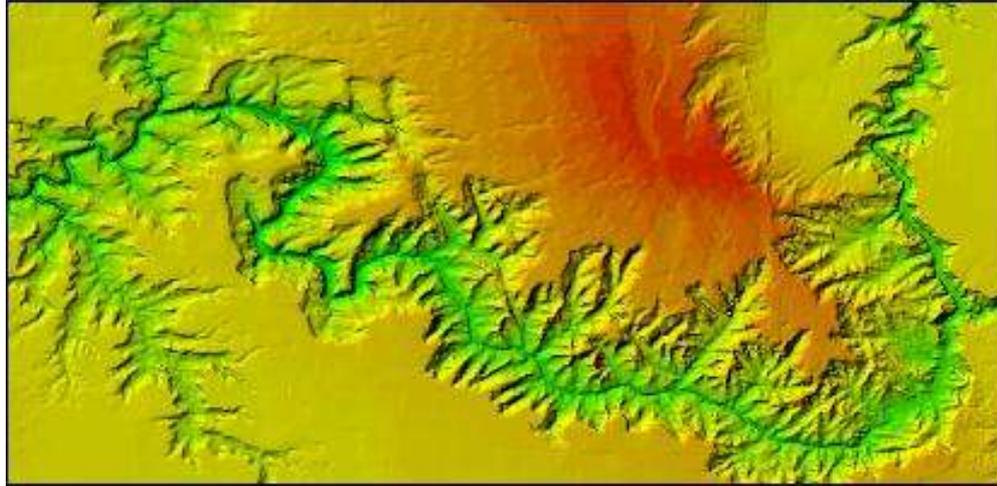
Captación río Cañaverales (Guajira):



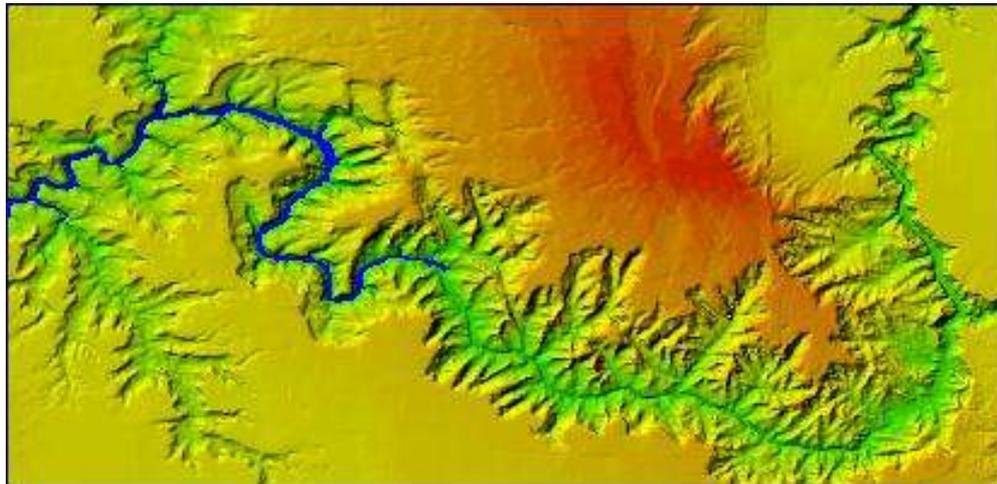
Almacenamiento

Vaso de un embalse

PRESA



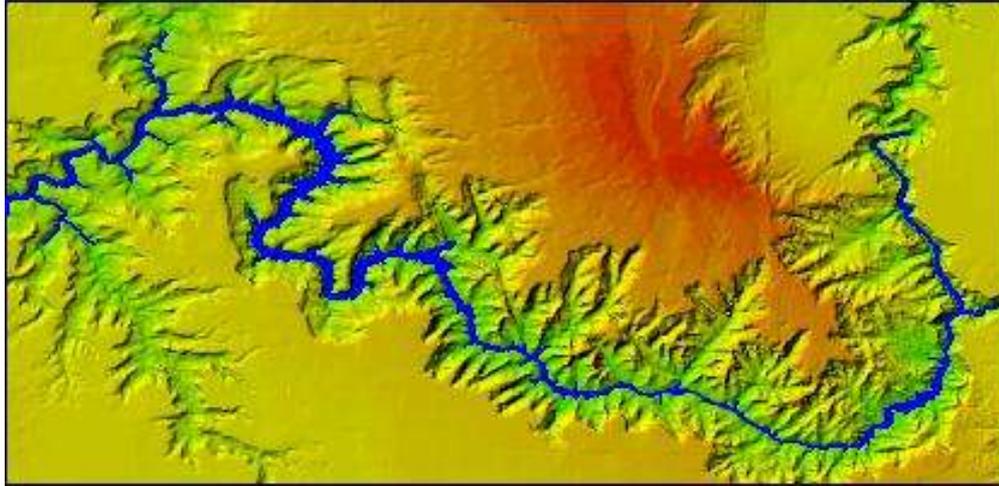
Cota 500 msnm



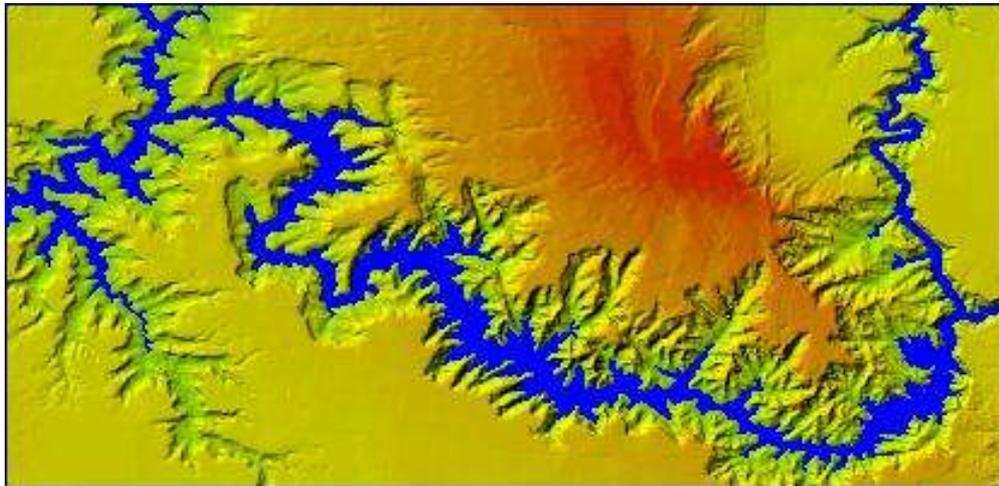
Cota 505 msnm



Vaso de un embalse



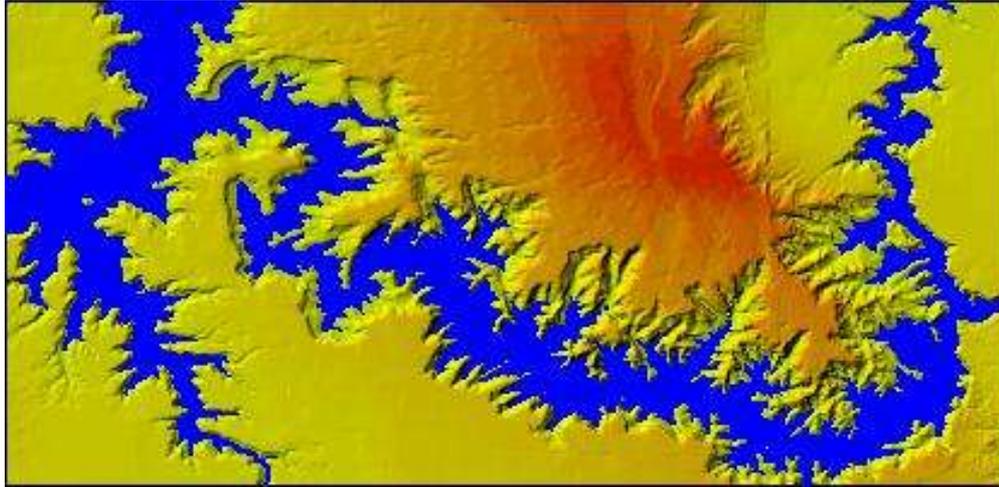
Cota 525 msnm



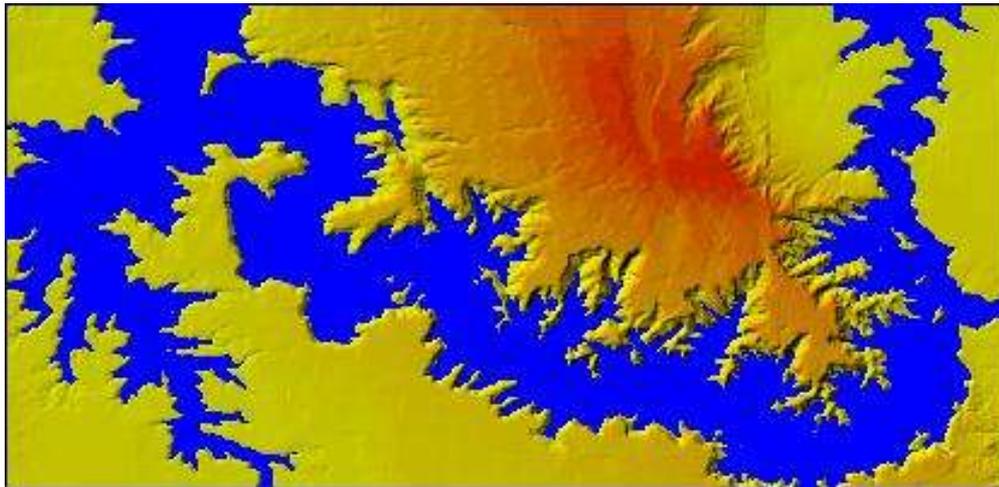
Cota 550 msnm



Vaso de un embalse



Cota 575 msnm



Cota 600 msnm

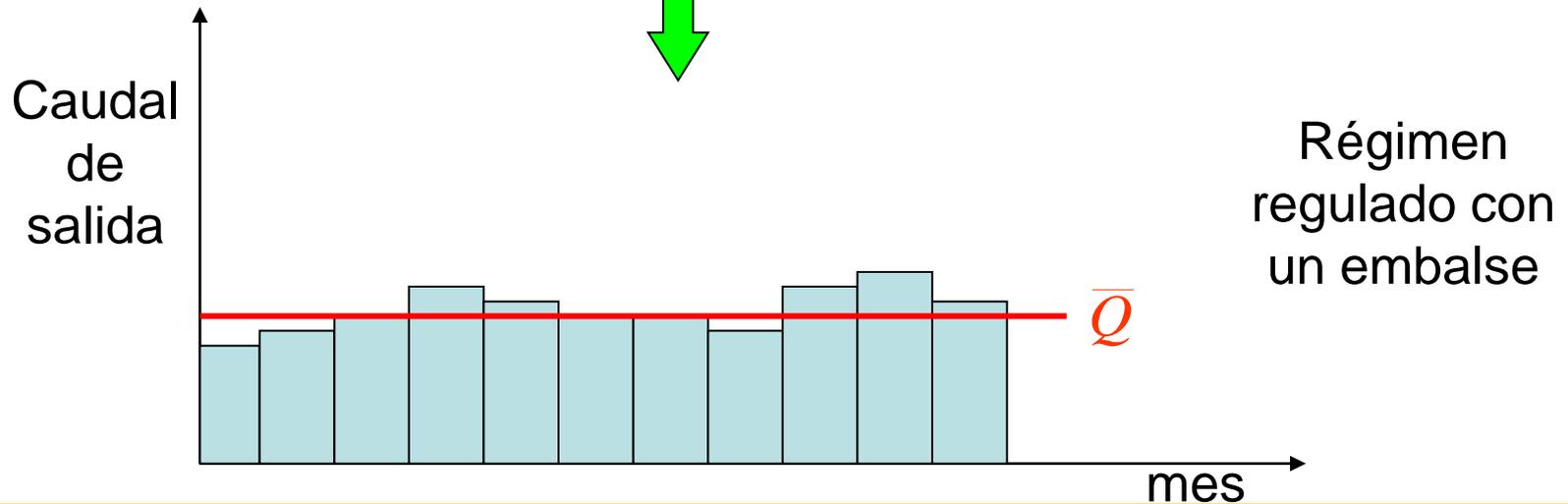
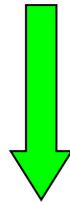
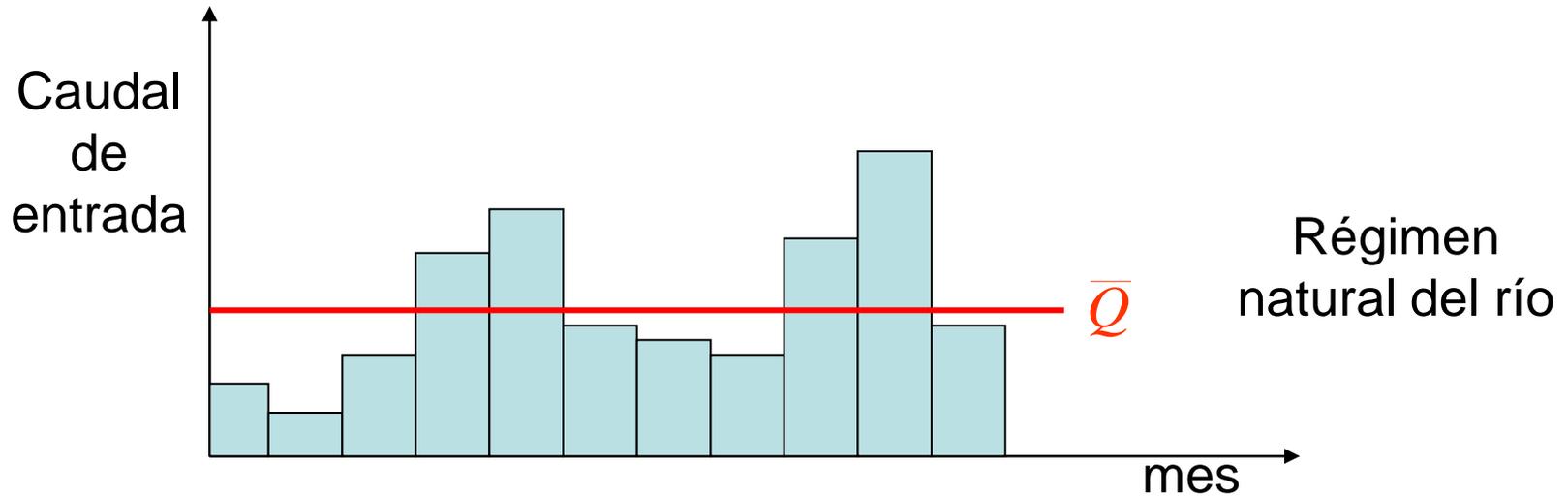




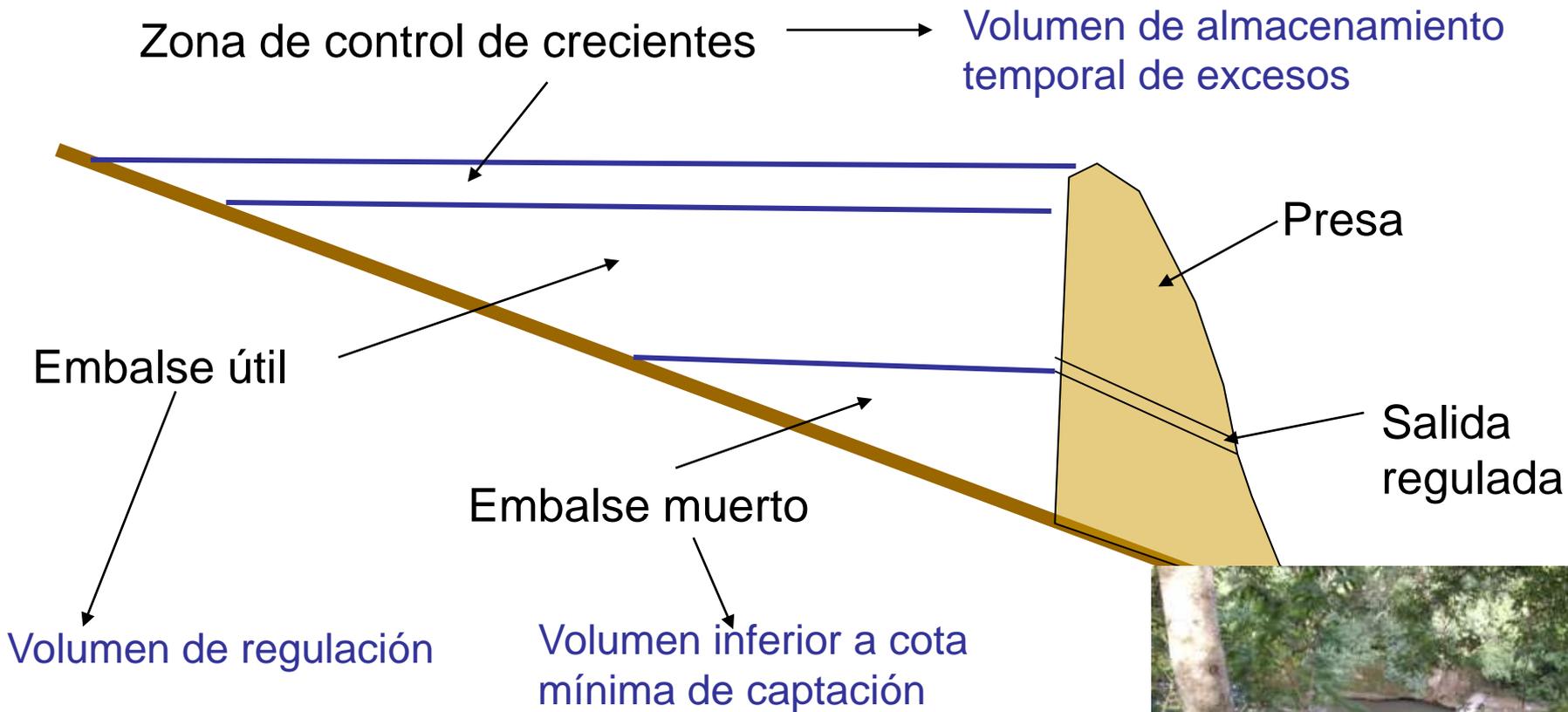
Central Hidroeléctrica del Guavio



Almacenamiento → Regulación



Zonificación de un embalse o almacenamiento



AGUA como AMENAZA

Amenaza (A):

Probabilidad de que se presente un evento natural o antrópico potencialmente dañino

Vulnerabilidad (V):

Susceptibilidad de un elemento expuesto ante una amenaza de ser afectado por ésta. Depende de:

1. Exposición del elemento ante la amenaza (E)
2. Resistencia del elemento ante la amenaza (R)



Conceptualmente:

$$V \approx \frac{E}{R}$$

RIESGO (Ri):

Probabilidad de daño de un elemento expuesto ante una amenaza. También puede ser definido en términos de daños

Conceptualmente: $Ri \approx A \frac{E}{R}$



Amenaza hidrológica:

- Crecientes
 - Inundaciones
 - Sequías
 - Granizadas
 - Tsunamis
 - Etc...
-
- Contaminación → salud pública, ecosistemas
 - Calidad de agua → agua potable



La amenaza hidrológica se cuantifica usualmente mediante el concepto de período de retorno

Período de retorno: intervalo de tiempo expresado en años en que **en promedio** la magnitud del evento amenazante es igualado o excedido

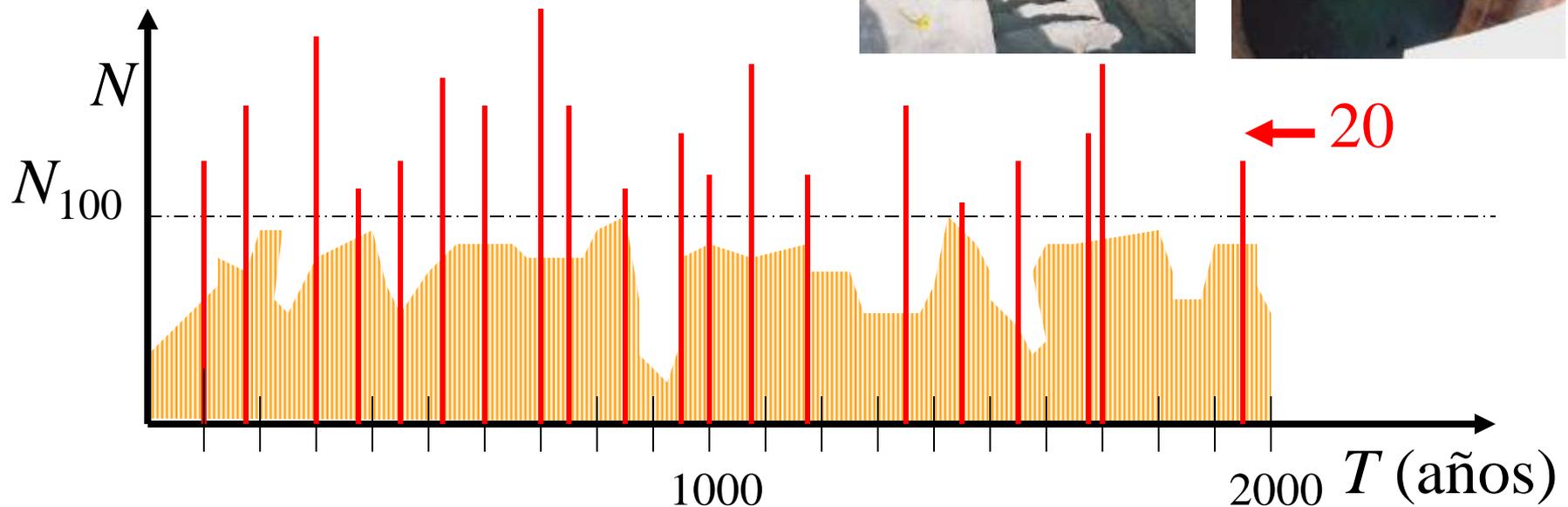
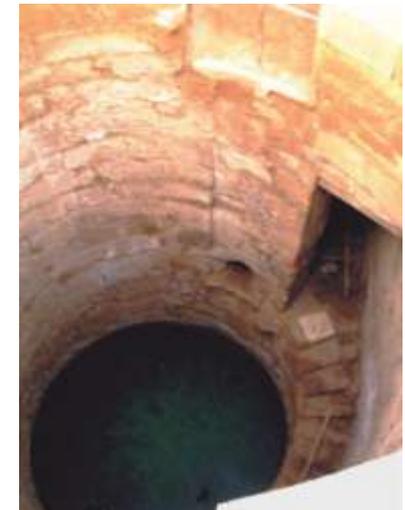
$$Q_{50} = 3506 \text{ m}^3/\text{s}$$

En promedio cada 50 años el valor de 3506 m³/s es igualado o excedido



Río Nilo:

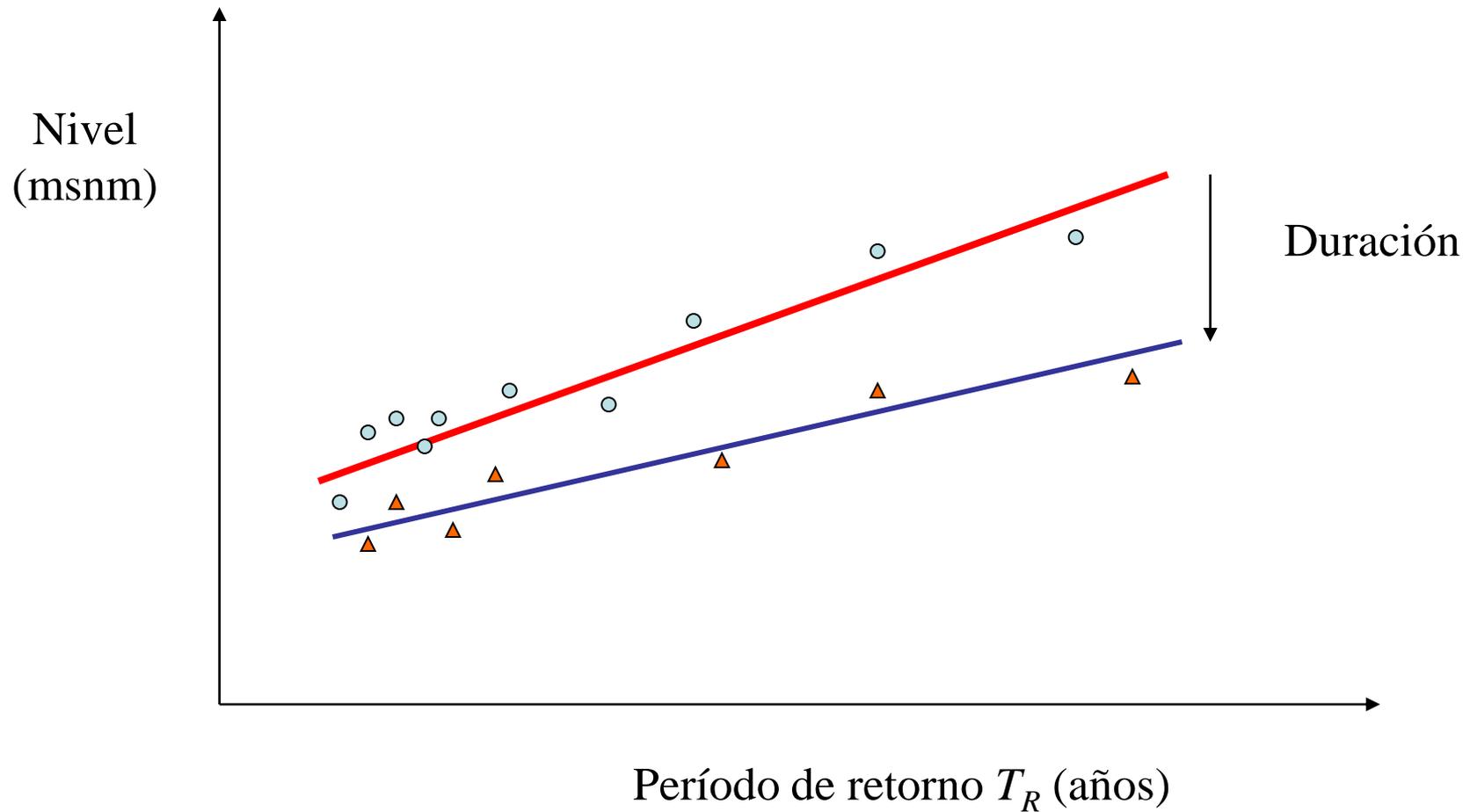
Existen registros limnimétricos (“nilómetros”) desde hace más de 2000 años

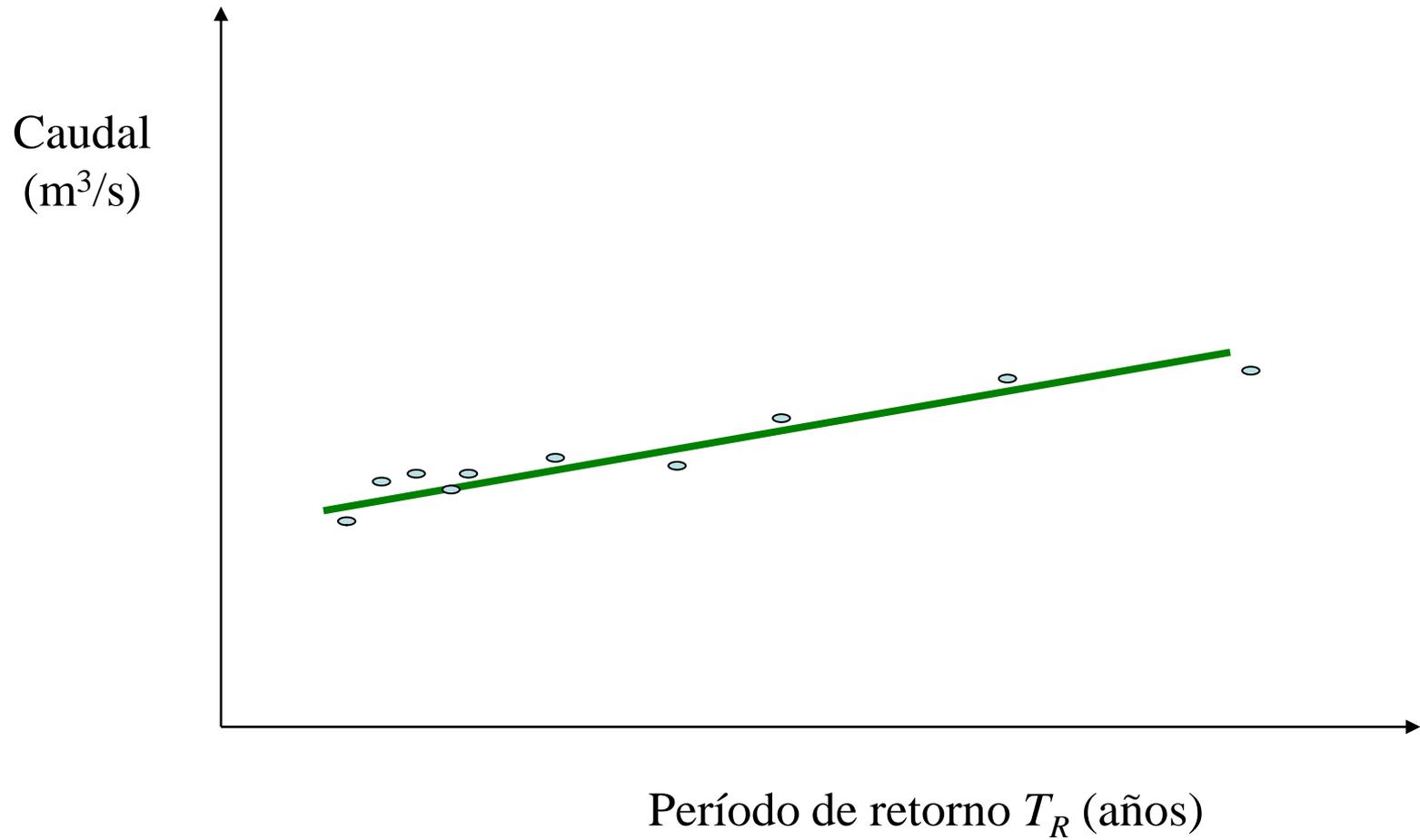


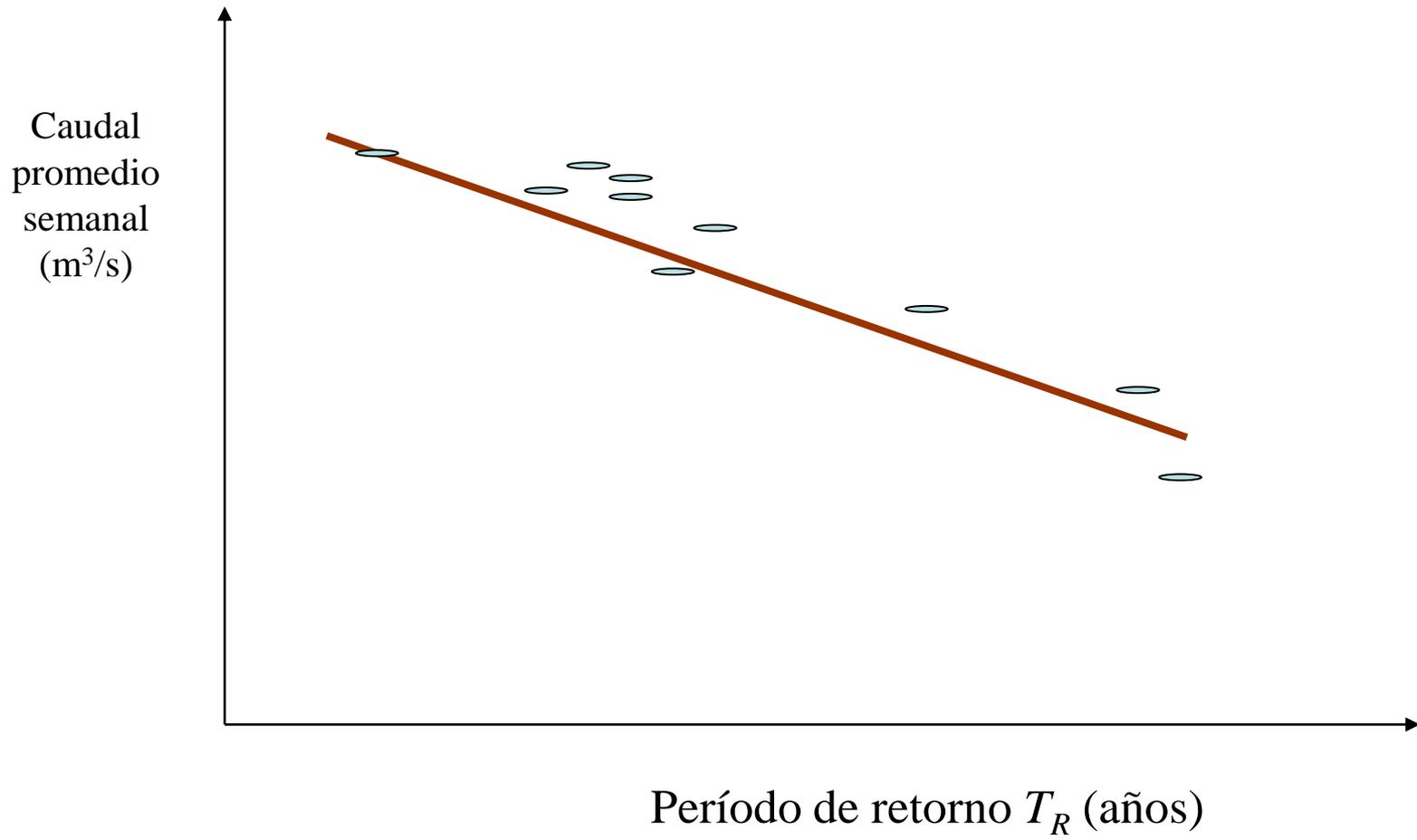
$$p = \frac{20}{2000} = 0.01 \Rightarrow T_R = \frac{1}{p} = 100 \text{ años}$$



Cuantificación de la amenaza: análisis de frecuencia de eventos extremos







Diseño de estructuras hidráulicas que tienen que lidiar con los efectos de eventos extremos

Ejemplo: una bocatoma de un acueducto ubicada en una quebrada

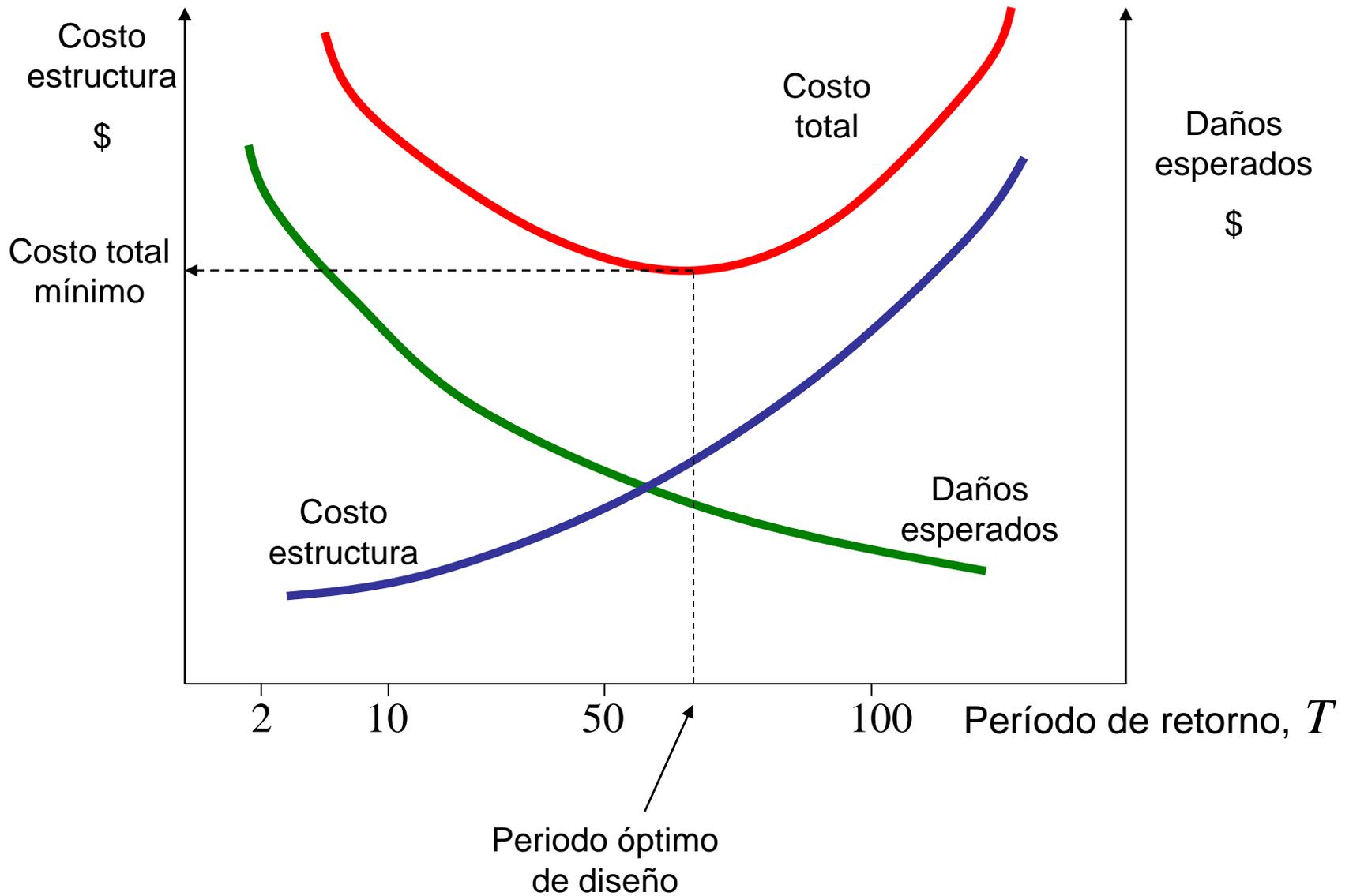
- Captación a filo de agua
- La bocatoma se diseña para captar el caudal de diseño (basado en estimación de población para el horizonte de planeamiento y dotación) con consideraciones de usos de agua aguas abajo y caudal ambiental
- Sin embargo, la quebrada tendrá crecientes que la bocatoma deberá soportar. ¿Todas? ¡No necesariamente!
- También, es necesario garantizar que la bocatoma pueda captar agua en épocas de estiaje. ¿Siempre? ¡No necesariamente!
- Usualmente se define un período de retorno de diseño



Debemos recordar que si se diseña una estructura para resistir una determinada amenaza, entre mayor sea el período de retorno de diseño, mayor capacidad tendrá la estructura para resistir la amenaza, es decir:

Si $T_D \uparrow \Rightarrow$ Estructura más robusta





Períodos de retorno de diseño

Estructura	T (años)	% valor límite
Culverts en vías de poco tráfico	5-10	
Culverts en vías de alto tráfico	50-100	
Puentes en vías secundarias	10-50	
Drenaje urbano colectores primarios	2-10	
Drenaje urbano colectores mayores	5-50	
Diques urbanos	50-200	
Presas baja amenaza (7-12 m ó 6100-1.2 mill m ³)	50-100	
Presas med amenaza (7-12 m ó 6100-1.2 mill m ³)	>100	
Presas med amenaza (12-30 m ó 1.2-61mill m ³)		50-100%
Presas med amenaza (>30 m ó > 61mill m ³)		100%
Presas alta amenaza (7-12 m ó 6100-1.2 mill m ³)		50-100%
Presas alta amenaza (12-30 m ó 1.2-61mill m ³)		100%
Presas alta amenaza (>30 m ó > 61mill m ³)		100%



Riesgo hidrológico asociado a una estructura hidráulica:

- Depende de la amenaza
- Depende de su vulnerabilidad ante la amenaza
- Depende de su exposición ante la amenaza

Si la estructura se diseña para un determinado período de retorno, T_D , su vulnerabilidad estará asociada a eventos con períodos de retorno mayores a éste (amenaza residual) y su exposición corresponderá a su vida útil. Así,

$$Ri = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_D}\right)^N \quad 1 - \left(1 - \frac{1}{100}\right)^{40} = 0.33 \approx 33\%$$

...de que por lo menos en 1 de los 40 años la estructura sea sobrepasada !



Período de Retorno de Diseño en años

Riesgo	Período de Exposición (años)								
	5	10	15	20	25	30	35	40	50
	0.01	498	995	1493	1990	2488	2985	3483	3980
0.03	198	395	593	790	988	1185	1383	1580	1975
0.05	98	195	293	390	488	585	683	780	975
0.08	65	129	193	257	321	385	449	514	642
0.10	48	95	143	190	238	285	333	380	475
0.15	31	62	93	124	154	185	216	247	308
0.20	23	45	68	90	113	135	157	180	225
0.25	18	35	53	70	87	105	122	140	174
0.30	15	29	43	57	71	85	99	113	141
0.40	10	20	30	40	49	59	69	79	98
0.50	8	15	22	29	37	44	51	58	73

Riesgo: probabilidad de que por lo menos 1 evento con un período de retorno mayor o igual al indicado se presente durante el período de exposición

