



# EL SENADO DE LA REPÚBLICA

**“Abasto, Superación de Inundaciones y Reciclamiento del Agua  
en la CDMX y Valle de México”**



***“Recarga Artificial al Agua Subterránea, algunas  
consideraciones: Ciudad de México”***



José Joel Carrillo Rivera, PhD  
Investigador  
Instituto de Geografía, UNAM  
[joeljcr@igg.unam.mx](mailto:joeljcr@igg.unam.mx)



Ciudad de México, 31 de Enero, 2018.

***“Recarga Artificial al Agua Subterránea, algunas consideraciones: Ciudad de México”***

**Temas a intercomunicar**

- 1.- El referente físico ¿Sabemos, dónde y cuánto recargar al agua subterránea, cuál es su funcionamiento, en dónde está?
- 2.- El referente químico ¿Cuál es la calidad del agua subterránea original y cómo ésta reaccionará con la nueva agua a infiltrar?
- 3.- ¿Qué es la recarga artificial?
- 4.- ¿Se cuenta con profesionales idóneos que manejen la metodología sistémica requerida? Y las normas?

¿Cuáles son las limitantes básicas que impiden un manejo sustentable del agua subterránea?

1.- ¿El referente físico: ¿Sabemos dónde y cuánto recargar al agua subterránea, cuál es su funcionamiento, en dónde está?

El referente químico ¿Cuál es la calidad del agua subterránea original y cómo ésta reaccionará con la nueva agua a infiltrar?

¿Qué es la recarga artificial?

¿Se cuenta con profesionales idóneos que manejen la metodología sistémica requerida? Y las normas?

## Distribución del agua en el mundo (Freeze y Cherry, 1979)

< 0.1% **Agua superficial** (ríos, lagos, atmósfera, suelo, biósfera)

94 % agua del mar (40 % a 80% fue agua subterránea, OIEA, 2009)

2 % hielo y glaciares

≈ 4 % **Agua subterránea**

### Agua dulce en el continente (incluye a México)

≈ 97.0% Agua subterránea

≈ 3.0% Agua superficial



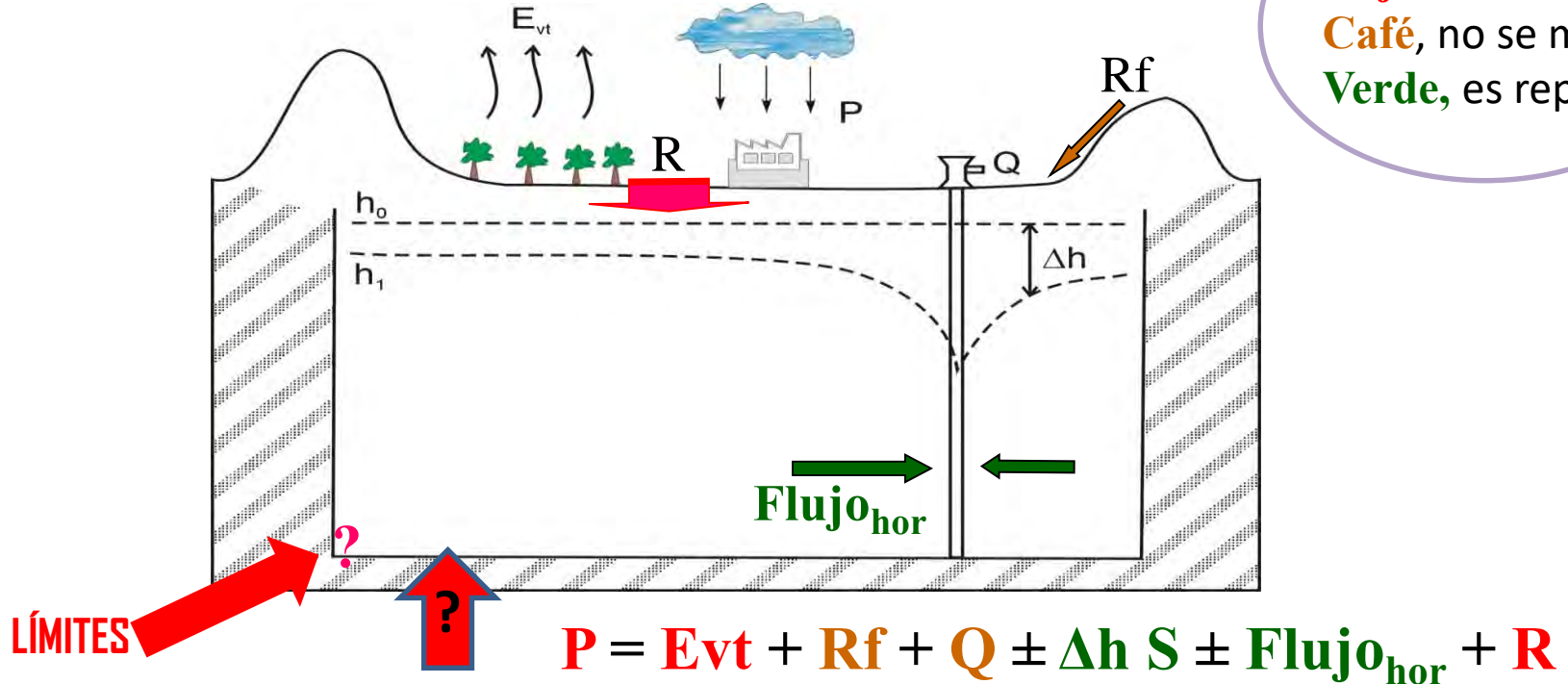
Sólo se usa un 0.007% del agua subterránea

- Cambios menores en el volumen de agua subterránea afectan en forma severa su calidad química, la presencia del agua superficial, y el hundimiento del suelo
- El agua subterránea es crucial para mantener el funcionamiento de ecosistemas y necesidades **vitales de la población...**



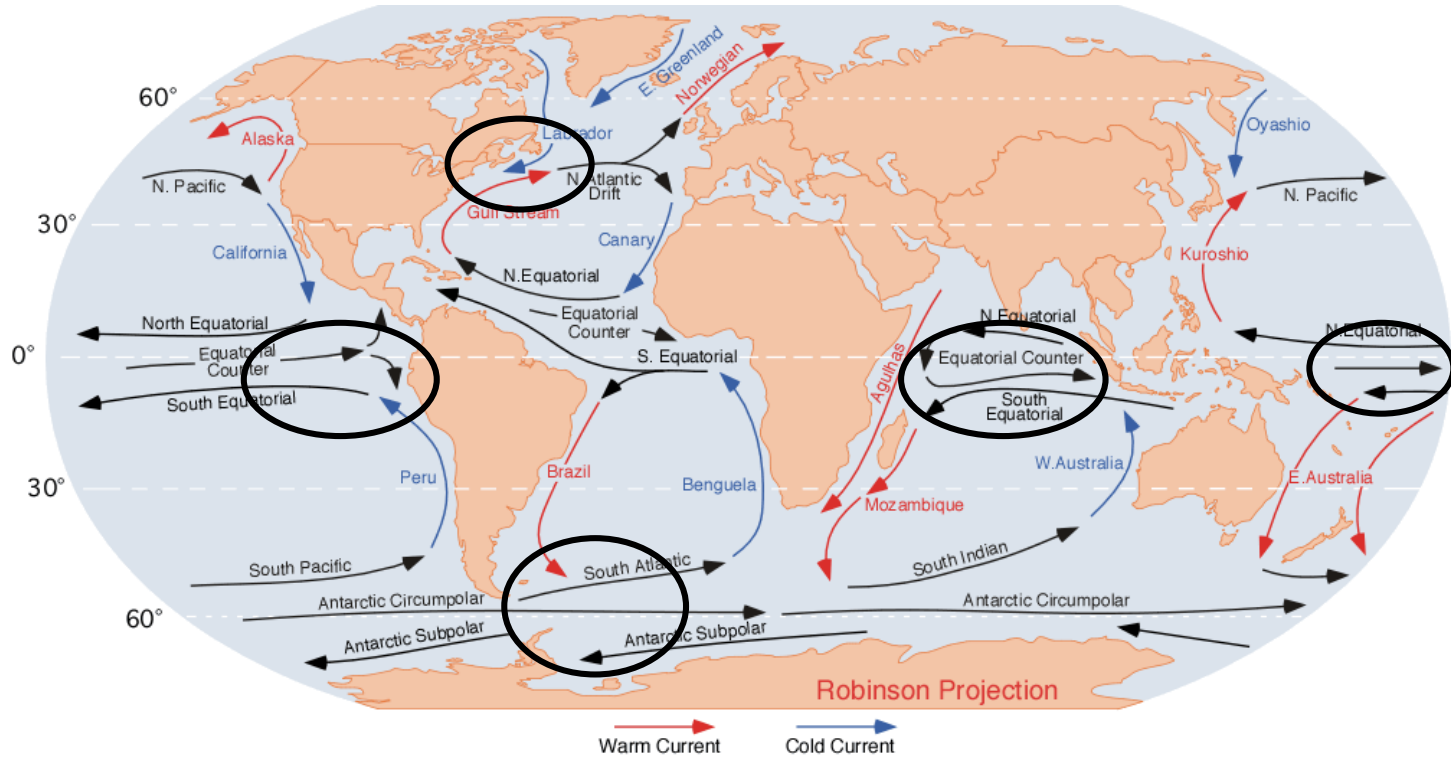
# Balance hidrológico (NOM011-CONAGUA)

**Rojo**, desconocido  
**Café**, no se miden  
**Verde**, es repetible



Necesita mostrar **condiciones y procesos** relacionados con el resto del ambiente e incluir **la calidad** del agua subterránea

# Corrientes Marinas



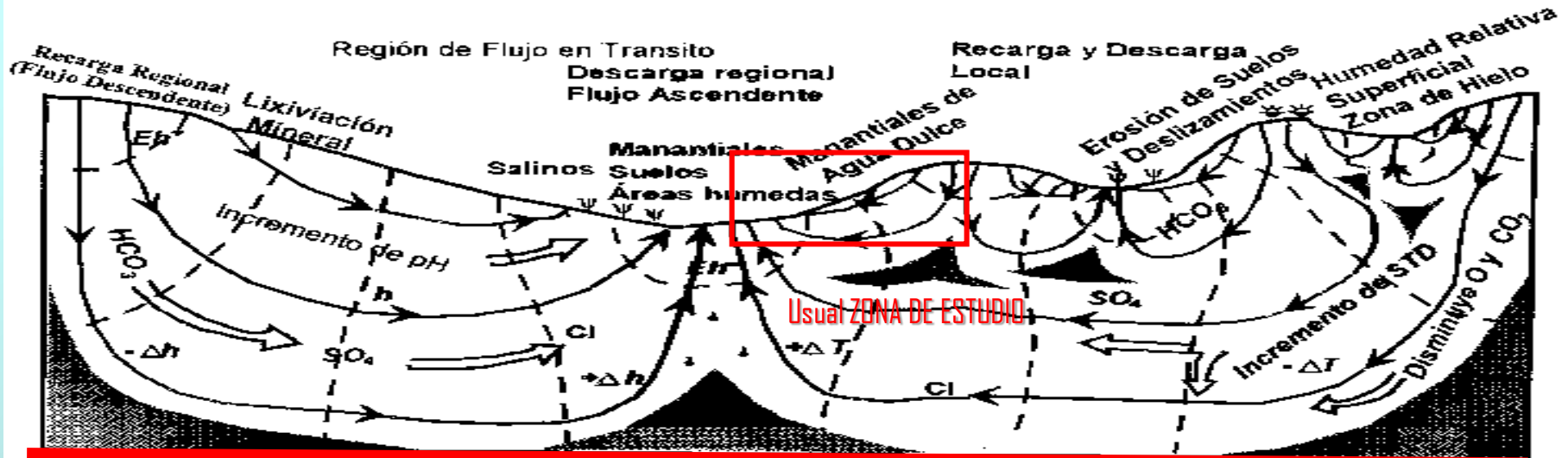








# Funcionamiento de los Sistemas de Flujo (Tóth, 1963...., 1995... 2009)

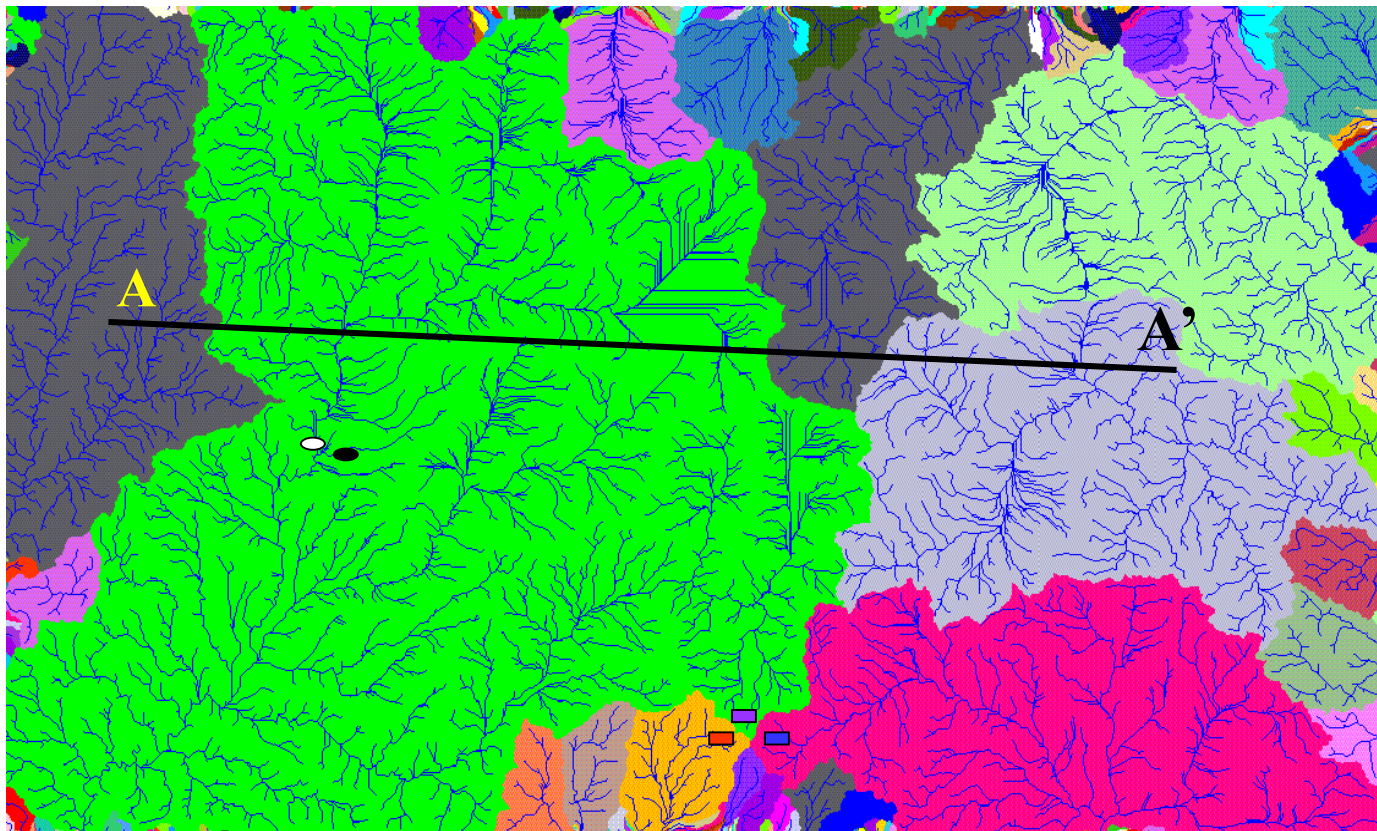


## ROCA BASAMENTO

## EXPLICACION

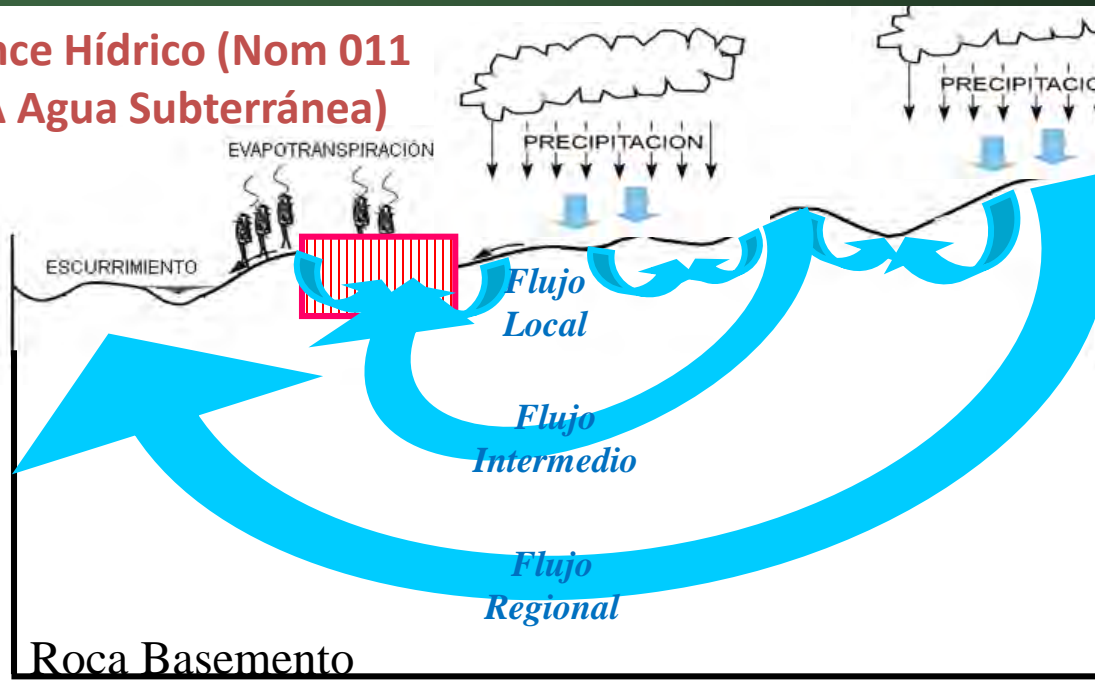
- Linea de Igual Carga Hidráulica
- Linea de Flujo
- ♂ ♀ Manantial: Frio, Caliente
- ψ ψ Freatofitas
- ✕ ✕ Xerofitas
- Eh+ Oxidante
- Eh- Reductor
- ↓ Acumulaciones de Minerales Trazas (Metálicos, Evaporitas e Hidrocarburos)
- Δh/h Subhidrostáticas
- h Hidrostáticas
- +Δh Superhidrostáticas
- ▲ Trampa Hidráulica: Convergencia y Acumulación de Materia Transportada y Calor
- ▴ Zona Cuasi-estancada con incremento de STD
- +Δ T, -Δ T Temperaturas Geotérmicas y Gradientes Anormales

## Funcionamiento del flujo subterráneo



# Balance Hídrico, y Metodología de Sistemas de Flujo (Tóth, 1963.....2012)

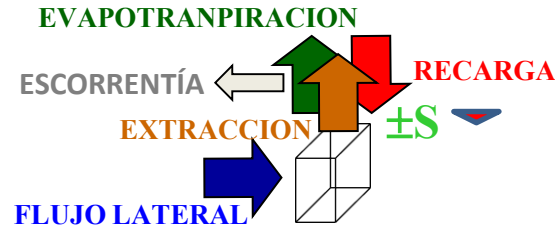
## Balance Hídrico (Nom 011 CNA Agua Subterránea)



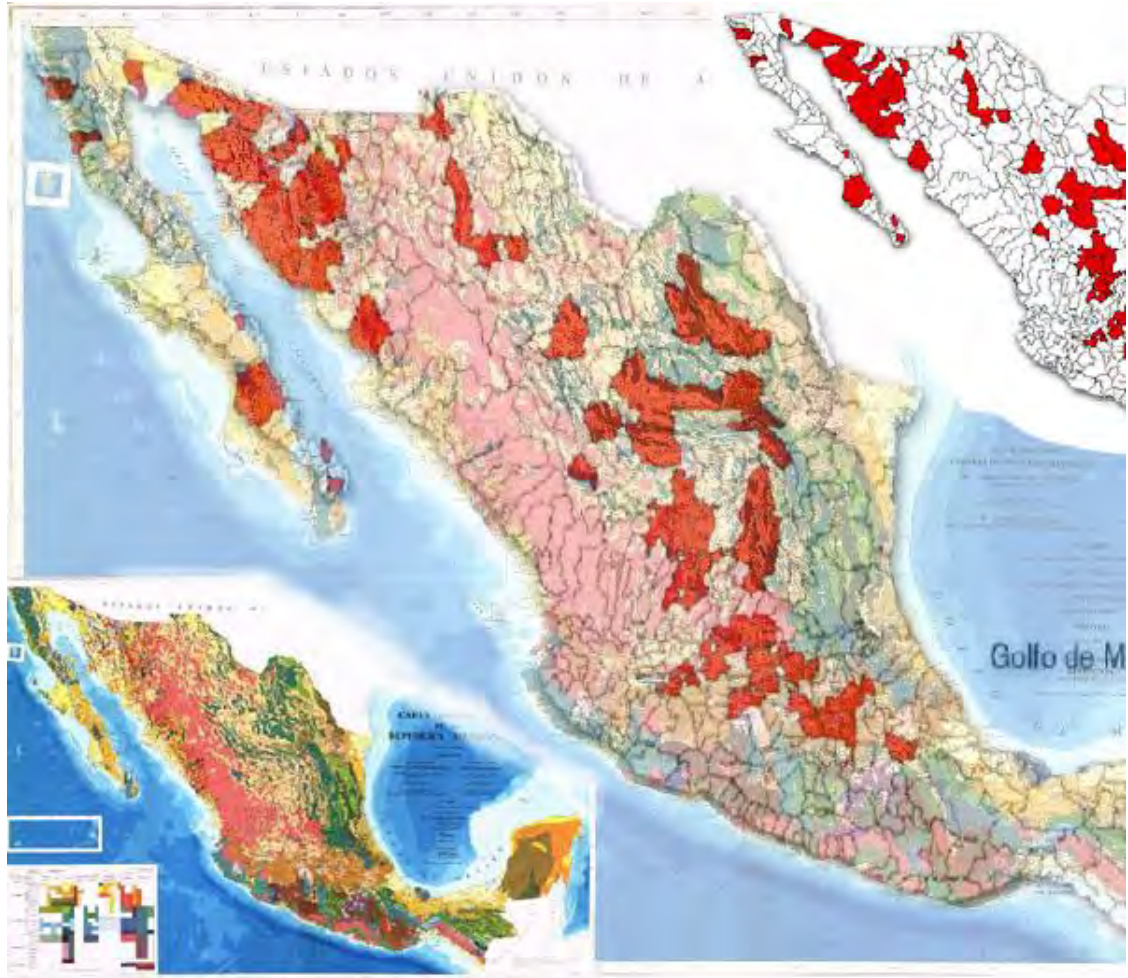
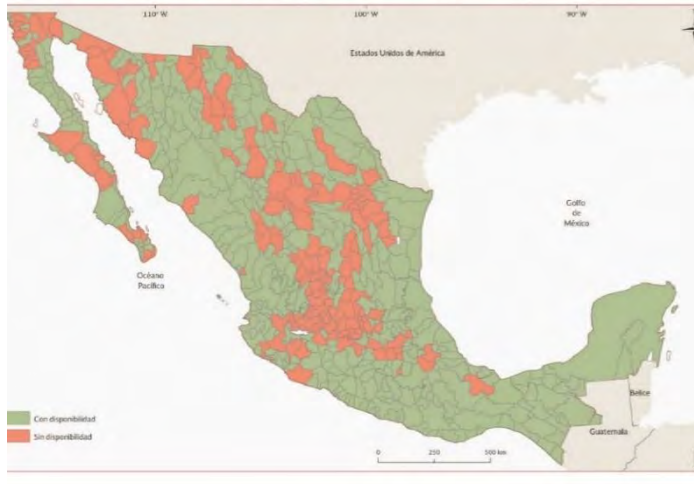
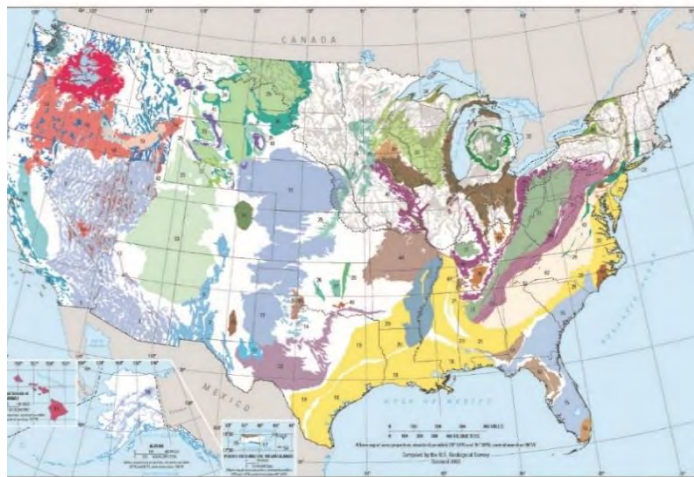
Notar más Vacíos del Balance Hídrico:

- No considera la calidad del agua,
- Ignora el flujo vertical ascendente,
- desdeña impactos ambientales, sequía y evolución climática

$$P = E_{vp} + E_{sc} + E_{xt} + R + Flu \pm \Delta S$$



ROCA BASEMENTO?



Acuífero "A"

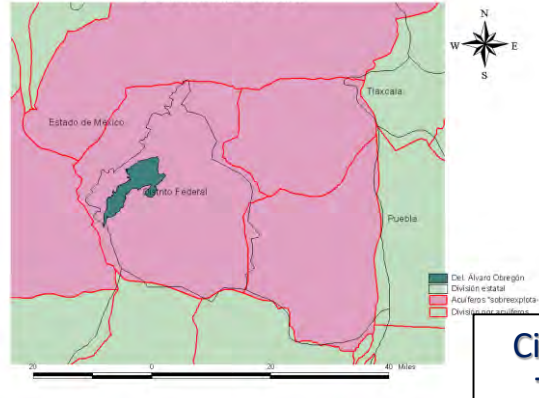
Acuífero "B"



Y el fondo o basamento?

3. 18. 2000

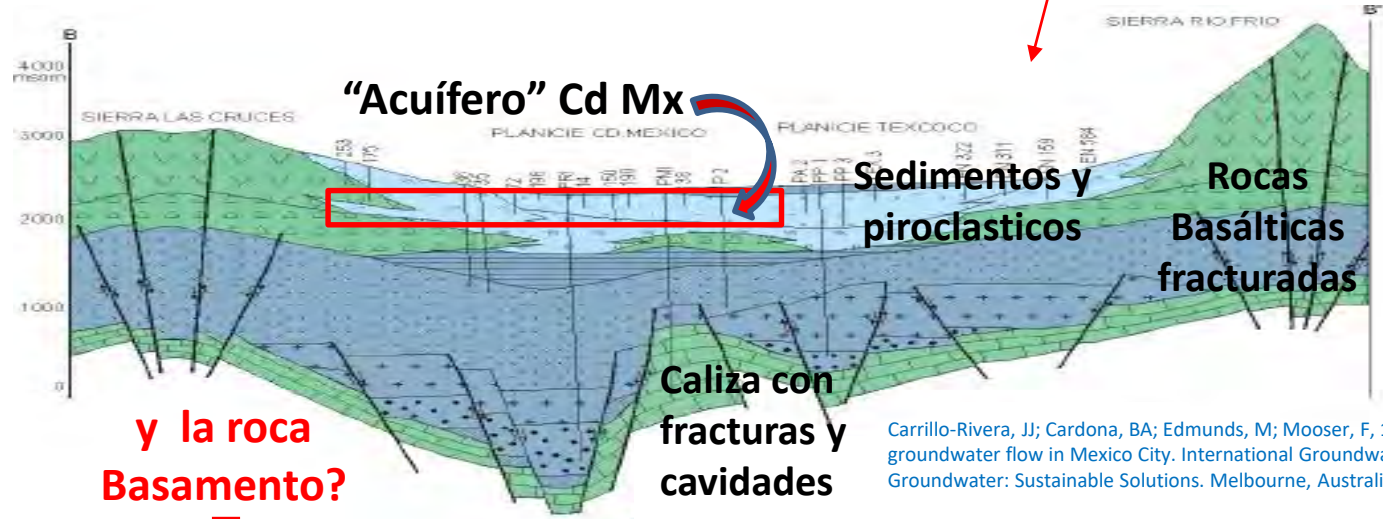
# Acuíferos CNA



**Cinturón Volcánico Trans-Mexicano**



**Sección en la Cuenca de México**



**y la roca Basamento?**

**Sedimentos y piroclásticos**

**Rocas Basálticas fracturadas**

**Caliza con fracturas y cavidades**

Carrillo-Rivera, JJ; Cardona, BA; Edmunds, M; Mooser, F, 1998. Induced vertical upward groundwater flow in Mexico City. International Groundwater Conference 1998, Groundwater: Sustainable Solutions. Melbourne, Australia. Febrero 8-13



DCXL REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO"							
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
DISTRITO FEDERAL							
0901	ZONA METROPOLITANA DE LA CD. DE MÉXICO	512.8	0.0	1,103.984799	623.8	0.000000	-591.184799
DCXLI REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO"							
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE HIDALGO							
1308	EL ASTILLERO	3.3	0.0	0.000000	0.0	3.300000	0.000000
DCXLII REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO"							
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE HIDALGO							
1309	CHAPANTONGO-ALFAJAYUCAN	136.9	112.9	4.297749	7.8	19.702251	0.000000
DCXLIII REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO"							
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE HIDALGO							
1310	VALLE DEL MEZQUITAL	515.0	293.0	161.502868	137.7	60.497132	0.000000
DCXLIV REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO"							
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE HIDALGO							
1311	AJACUBA	25.7	15.6	0.693225	5.0	9.406775	0.000000
DCXLV REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO"							
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE HIDALGO							
1312	IXMIQUILPAN	150.1	124.6	2.217978	19.3	23.282022	0.000000
DCXLVI REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO"							
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							
ESTADO DE HIDALGO							
1313	ACTOPAN-SANTIAGO DE ANAYA	208.1	90.0	30.831409	45.9	87.268591	0.000000
DCXLVII REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO"							
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							

- R: recarga media anual;
- DNCOM: descarga natural comprometida;
- VCAS: volumen concesionado de agua subterránea;
- VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en **estudios técnicos**;
- DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000.
- DEFICIT

¿Estudios de agua subterránea por cuenca superficial?

¿Cuáles son las limitantes básicas que impiden un manejo sustentable del agua subterránea?

Referente físico, ¿Sabemos dónde y cuánto recargar al agua subterránea, cuál es su funcionamiento, en dónde está?

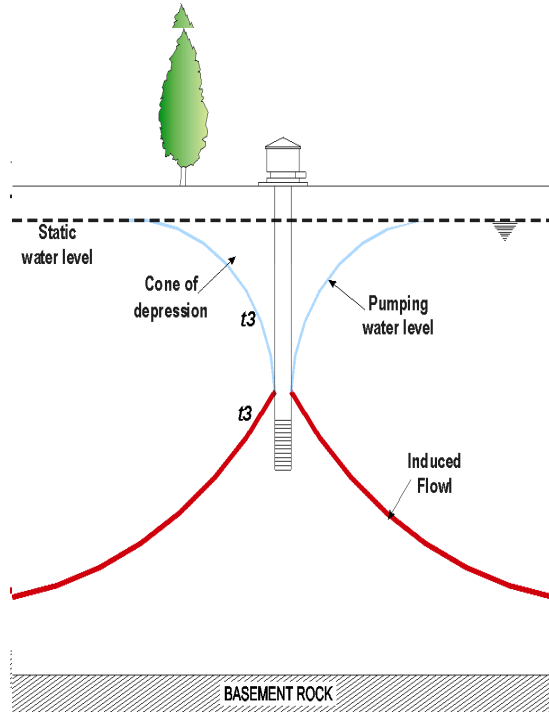
2.- Referente químico, ¿Cuál es la calidad del agua subterránea original y cómo ésta reaccionará con la nueva agua a infiltrar?

¿Qué es la recarga artificial?

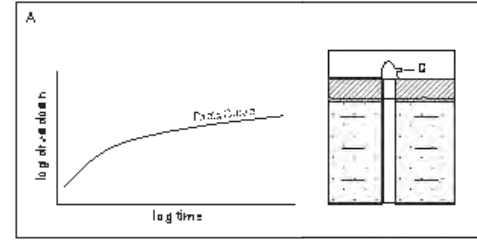
¿Se cuenta con profesionales idóneos que manejen la metodología sistémica requerida? Y las normas?

# Modelación interdisciplinaria del Agua Subterránea

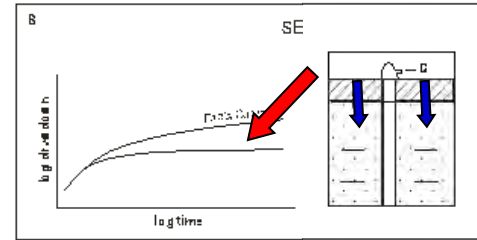
## Prueba de bombeo (solución analítica)



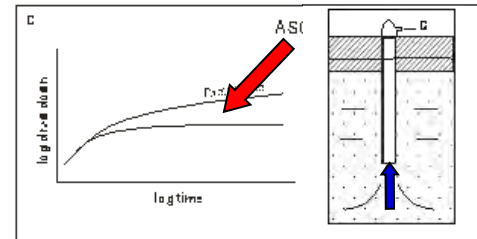
Respuesta  
Confinada

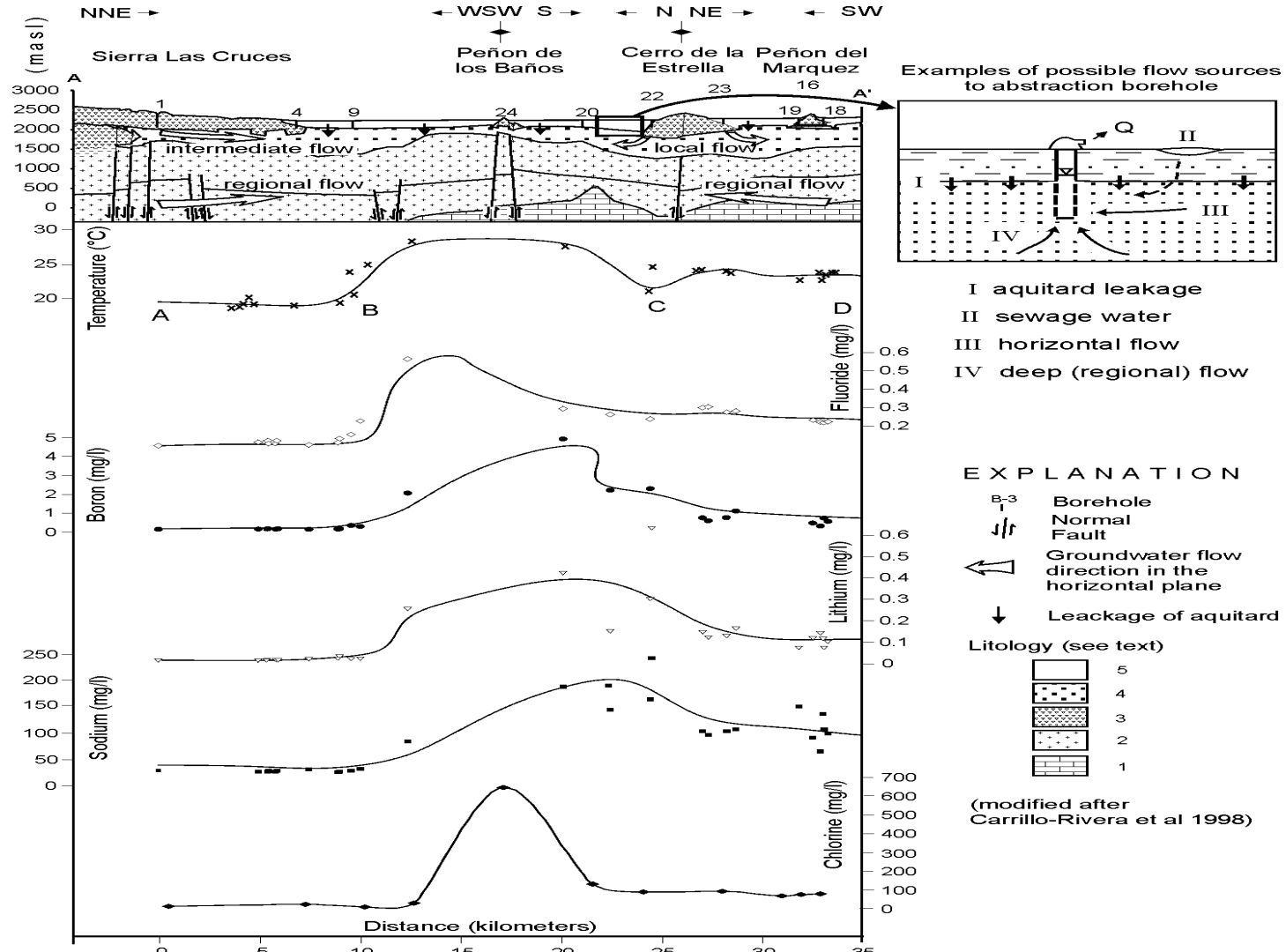


Respuesta  
Semi-confinada



Respuesta  
de unidad  
acuifera de  
gran espesor



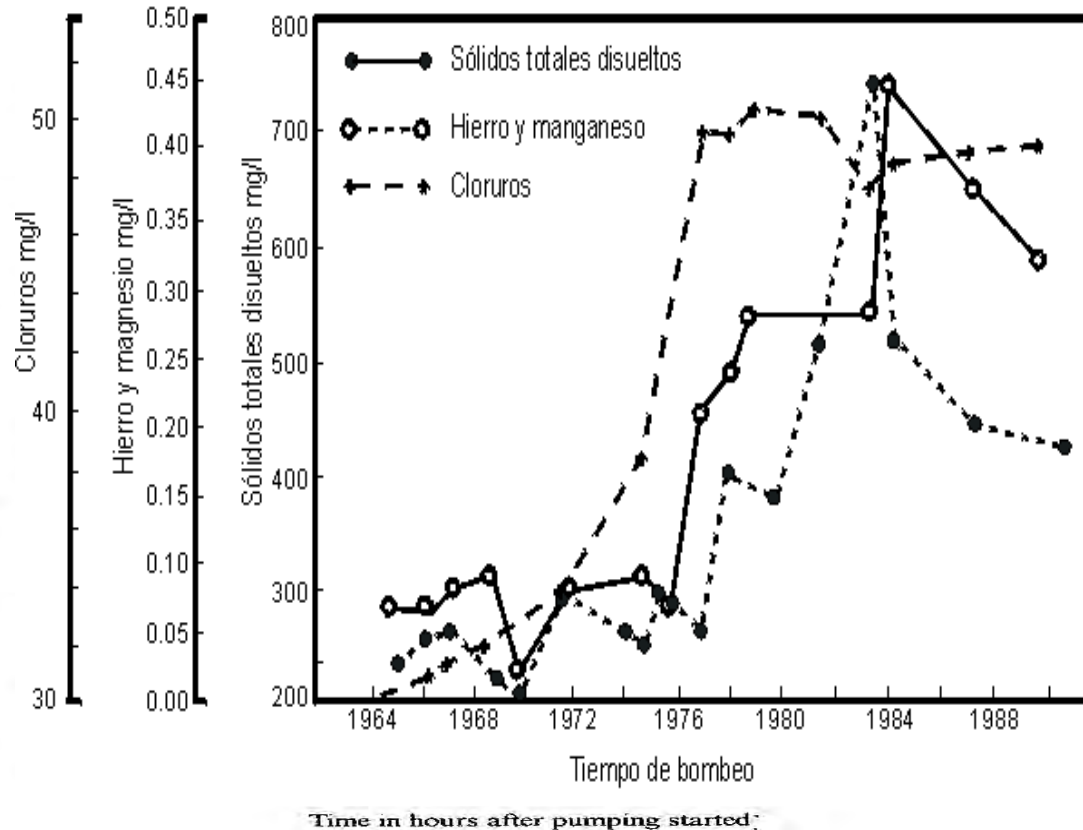


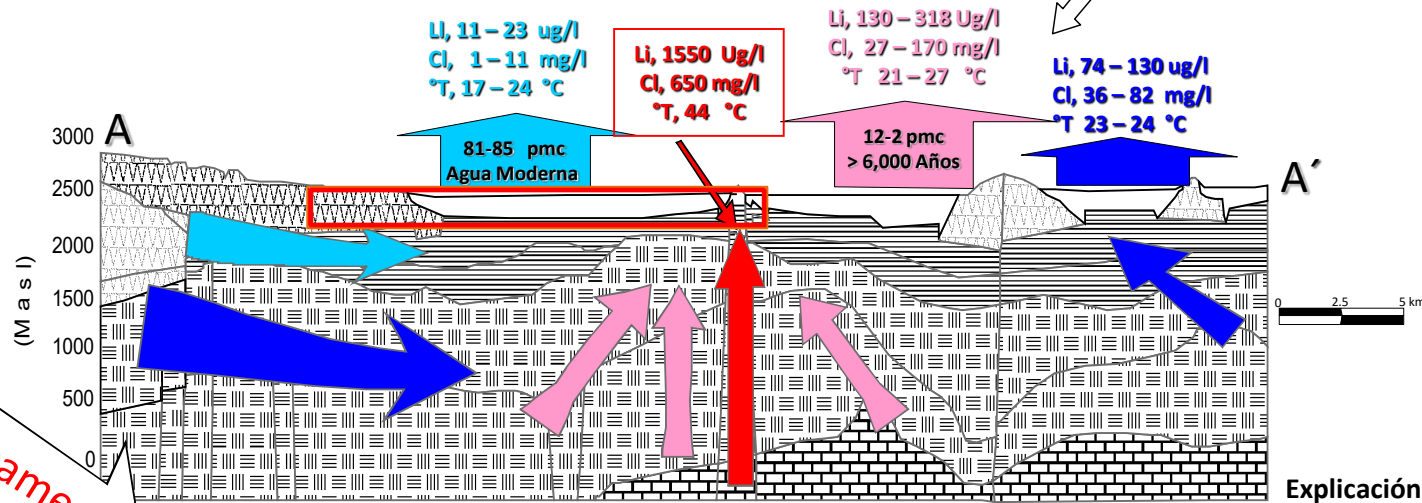
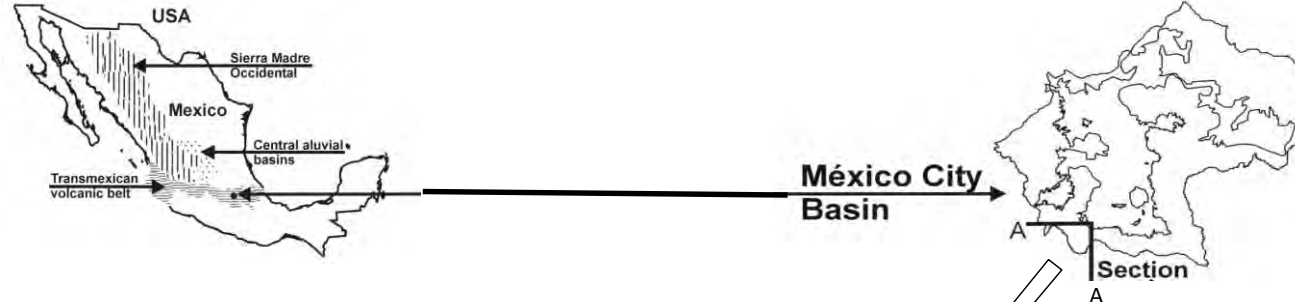
Respuesta en la química del agua extraída en dos pozos en el Centro-Norte de México.

**Pozo A, con aporte lateral;** **Pozo B, con aporte ASCENDENTE de 1.5-2.0 km de profundidad**

**Pozo "B"**  
Calidad  
cambia en  
minutos

**Pozo "A"**  
Calidad sin  
cambio

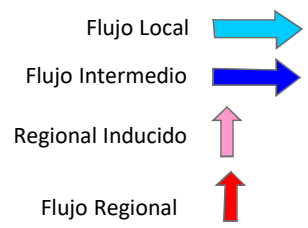




Litología

① ② ③ ④ ⑤

1. Caliza Cretácica
2. Basalto & Riolita (volcánico), Terciarios
3. Sedimento lacustre & piroclasto, Plioceno
4. Basaltos-andesita Plioceno/Cuaternario
5. Aluvión (acuitardo) Cuaternario/Reciente



¿Cuáles son las limitantes básicas que impiden un manejo sustentable del agua subterránea?

¿Sabemos cuánta agua subterránea tenemos, cuál es su funcionamiento, en dónde está?

¿Cuál es la calidad del agua subterránea original y cómo ésta reaccionará con la nueva agua a infiltrar?

**3.- ¿Qué es la recarga artificial?**

¿Se cuenta con profesionales idóneos que manejen la metodología sistémica requerida? Y las normas?

# Definición

Se designa como recarga artificial a un conjunto de técnicas que permiten, mediante intervención programada e introducción directa o inducida de agua en un acuífero, incrementar el grado de garantía **y disponibilidad del agua**, así como actuar **sobre su calidad**.

# Objetivos

Esta tecnología pretende contribuir, siempre que sea **factible técnica y económicamente**, a una gestión más racional de la potencialidad hídrica de un sistema hidrogeológico. Persigue los siguientes objetivos:

- Aumento y optimización del volumen de agua subterránea
- Prevención o corrección del deterioro de la calidad del agua subterránea



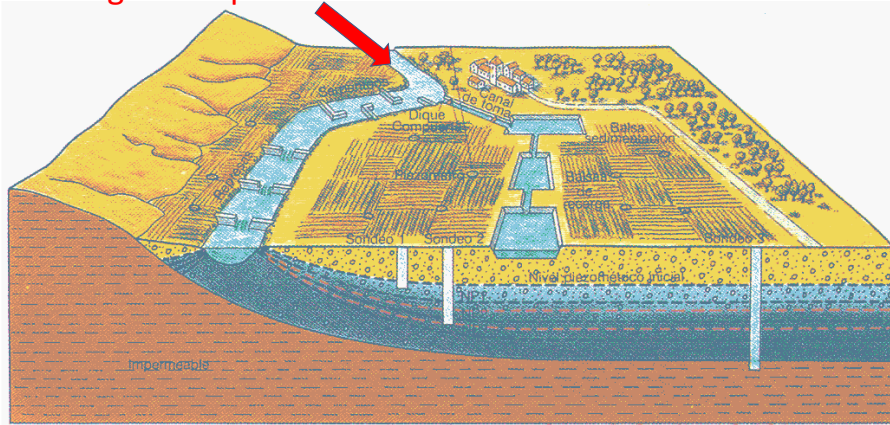
# Aplicaciones

## MAR (*Managed Aquifer Recharge*)

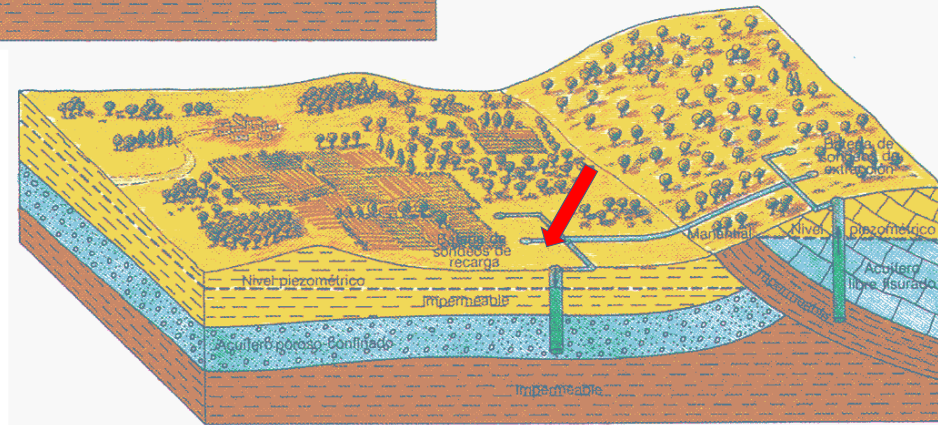
- Almacenamiento subterráneo de escorrentías superficiales no reguladas.
- Reducción o eliminación del descenso piezométrico.
- Apoyo a determinados esquemas de utilización conjunta o coordinada.
- Mantenimiento hídrico de enclaves ecológicos o ambientales.
- Reducción de costos de transporte, almacenamiento o bombeo.
- Actuaciones específicas sobre **problemas de subsidencia**.
- **Disminución o corrección de problemas de intrusión marina**.
- Aprovechamiento de las **propiedades del suelo y de la zona no saturada** como elemento **de tratamiento** tanto para agua potable como residual.
- **Dilución de excesivo** contenido en nitratos, cloruros u otros compuestos químicos.

# Métodos de Recarga Artificial

Sistema de Recarga en Superficie



Sistema de Recarga por Transferencia



# Colmatación

- Corresponde al proceso de **acumulación de materiales sobre la superficie donde se infiltra el agua**. Su efecto es una reducción de la capacidad de recarga o entrada de agua.
- Puede deberse a efectos mecánicos, actividad biológica y procesos químicos.
- **Es el mayor problema que enfrenta la recarga artificial**. Incluso en casos con baja concentración de sólidos en suspensión, es necesario programar sistemas de limpieza y descolmatado de las instalaciones.
- Después de cierto tiempo y volumen de agua recargado, **es posible se abandonen los dispositivos de recarga** al no poderse regenerar su capacidad de infiltración con el caudal operativo inicial.
- Debido al proceso de degeneración de la capacidad inicial de infiltración, se requiere estimar la vida útil de las instalaciones y realizar estudios **económicos pertinentes para cuantificar su rentabilidad**.
- Según instalaciones en USA: la vida útil de balsas es ligeramente superior a 10 años y en pozos de 5 a 10 años. En infraestructuras de gran envergadura pueden alcanzarse hasta 20 años.
- Es necesario establecer estudios económicos de la **relación agua recargada/existente**.

¿Cuáles son las limitantes básicas que impiden un manejo sustentable del agua subterránea?

¿Sabemos cuánta agua subterránea tenemos, cuál es su funcionamiento, en dónde está?

¿Cuál es la calidad del agua subterránea original y cómo ésta reaccionará con la nueva agua a infiltrar?

¿Qué es la recarga artificial?

4.- ¿Se cuenta con profesionales idóneos que manejen la metodología sistémica requerida? Y las normas?

Considerando que México cuenta con 32 entidades, en general se tiene

**≈0.25 Hidrogeólogo** por estado

*(no Geohidrólogo ≈ hidráulica subterránea)*

**El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua** cuenta con <2% de su personal en el área de agua subterránea, de unos 450 expertos en hidráulica

**El abasto en México es >76% por agua subterránea**

**El 97% en volumen es agua subterránea**

Se ha olvidado el referente, perfil, número, profesionalización, etc del personal que se requiere; se desconoce el funcionamiento del agua subterránea, su liga con ecosistemas, su respuesta al “desarrollo”, los efectos a la calidad del agua extraída, su relación con ecosistemas costeros; cómo se definirán las “reservas probadas”; falta: monitoreo (**nivel de referencia**), exploración, información asequible, etc

# IAH, Student 2016 World Competition on Regional Groundwater Flow Systems

China University of Geosciences	Wuhan	China
University of Sfax	Sfax	Tunisia
University of Alberta	Edmonton	Canada
Eötvös Loránd University	Budapest	Hungary
TU Dresden	Dresden	Germany
University of Tunis El Manar	Tunis	Tunisia
Oil and Gas Research Institute Russian Academy of Science	Moskva	Russia
University de Los Andes	Bogotá	Colombia
University Laval	Québec	Canada
National Institute of Agronomy of Tunis	Tunis	Tunisia
University of Rouen	Rouen	France
Ecole Nationale Supérieure en Environnement, Géoressources et Ingénierie du Développement durable	Bordeaux	France
Université Franche-Comté	Besancon	France

En México, los programas específicos sobre Hidrogeología Moderna (**sistemas de flujo**) esperan ser reconocidos, al presente **no son opción**; sólo se ofrece hidráulica subterránea en el currículo de las maestrías y/o doctorado.

**No hay una licenciatura en Hidrogeología Moderna (sistemas de flujo).**

**El interés en estudiar las aguas subterráneas transfronterizas es inexistente**

## **INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN SUPERIOR CON PROGRAMA EN AGUA SUBTERRÁNEA**

**Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna**

Posgrado en Producción Agropecuaria

Hidrología Superficial y Subterránea en Zonas Áridas

**Universidad Autónoma de Nuevo León**

Maestría en Ingeniería con orientación en Hidrología Subterránea

**Universidad Autónoma del Estado de México**

Maestría en Ciencias del Agua, con orientación en Agua Subterránea

## **Universidad Nacional Autónoma de México**

- Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Ambiental, Agua Subterránea (opción)
- Posgrado en Ciencias de la Tierra, Agua Subterránea (opción) Juriquilla(#)
- Posgrado en Geografía, Maestría en Geografía Ambiental, Agua Subterránea (opción)(#)

## **Tecnológico de Monterrey**

Centro Latinoamericano de Estudios del Agua,

- Agua subterránea (opción)

## **Instituto Mexicano de Tecnología del Agua**

Maestría en Ciencias y Tecnología del Agua

- Área en Sistemas Ambientales (opción en Agua Subterránea)

El IPN, el Colegio de Chihuahua y universidades como **San Luis Potosí(#)**, **Sonora**, **Oaxaca**, entre otras, tienen programas de posgrado donde **el agua subterránea puede ser opción**

No existe programa de estudios sobre **Agua Subterránea Transfronteriza**

**(#).- Sistemas de flujo con los tutores que lo ofertan**



## CONCLUSIONES

**Antes de una acción** de recarga artificial se contará con estudios que incorporen el funcionamiento hidrogeológico del receptor (agua y rocas, flujos verticales)

**El funcionamiento** del receptor incluirá además de la forma de movimiento del agua subterránea, su evolución química bajo nuevas condiciones de mezcla con agua a inyectar; compatibilidad geoquímica de las aguas y roca (serán siempre las mismas?)

**Es imprescindible** contar con un análisis económico que incorpore costo del agua por inyectar, costo por sacarla, relación volumen de agua asequible/inyectada

**Agua residual tratada** manifiesta crecimiento de microorganismos, con problemas potenciales a la salud y de colmatación)

**La recarga artificial** no siempre será por vía de la zona no-saturada (suelo) sino profunda.

**Zonas que** geológicamente podrán ser poco permeables, el flujo puede aumentar con la perturbación de las condiciones iniciales.

**Actualizar** la normatividad del caso, así como las normas relacionadas

“...No le puedes enseñar nada a nadie, sólo le puedes ayudar a que lo encuentre dentro de si...”

**Galileo Galilei** (1564-1642) *Físico y Astrónomo Italiano.*

GRACIAS por SU  
ATENCIÓN!!!