UNIDAD 4: CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

4.A. Elementos de la química del Agua

Elementos de química del agua. Composición de las aguas subterráneas.

4.B. Evolución Geoquímica del Agua Subterránea

Evolución geoquímica del agua subterránea. Procesos de interacción entre el agua y el medio geológico.

4.C. Interpretaciones

Técnicas de estudio individuales a nivel regional: hidrogramas, perfiles hidroquímicos, diagramas. Representaciones gráficas en los estudios hidroquímicos.

4.D. Calidad del agua, clasificaciones y contaminación

Calidad de las aguas subterráneas. Clasificación de las aguas subterráneas. Vulnerabilidad de acuíferos. Contaminación de acuíferos. Distintas causas. Monitoreo de los reservorios de agua subterránea, su importancia. Toma de muestras.

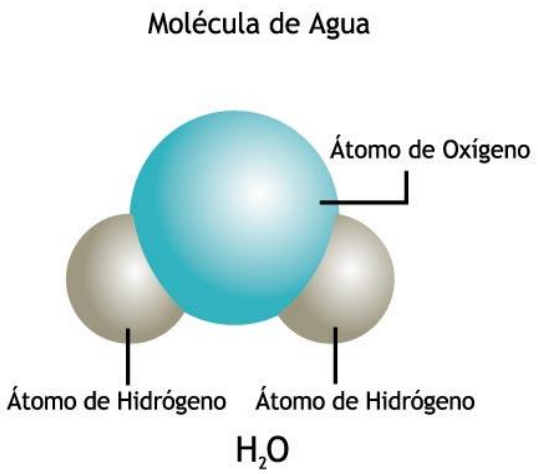
HIDROQUÍMICA

Ciencia que estudia las características físicas y químicas de los recursos hídricos, a fin de determinar:

- Caracterización o composición
- Calidad orientada al uso
- Afectación por contaminación

Molécula de agua

- **2 átomos de H y 1 átomo de O**
- **Neutra** { conjunto de cargas positivas = conjunto de cargas negativas

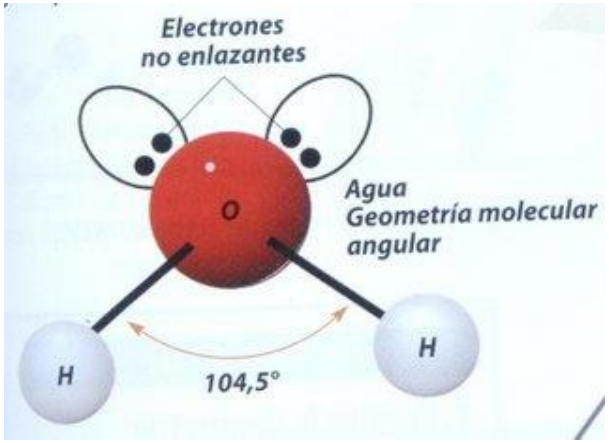


Átomo de oxígeno atrae **e^-** más fuertemente que los átomos de hidrógeno

- **zona con exceso de carga negativa**
- **zona con exceso de carga positiva**

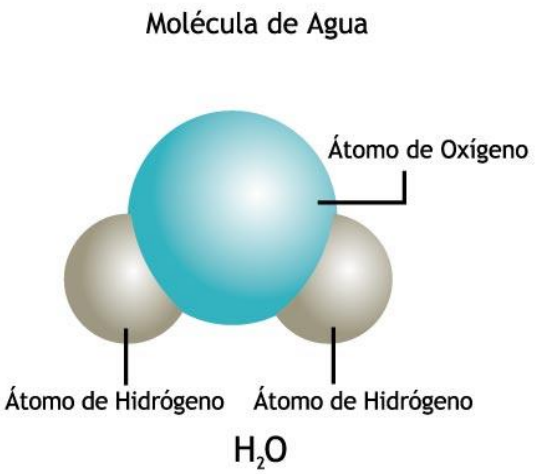
Molécula de agua es **DIPOLAR**

Gran atracción entre las moléculas de agua y se unen entre sí por enlaces de puentes de hidrógeno.



Molécula de agua

- **2 átomos de H y 1 átomo de O**
- **Neutra** { conjunto de cargas positivas = conjunto de cargas negativas



Átomo de oxígeno atrae **e^-** más fuertemente que los átomos de hidrógeno

- **zona con exceso de carga negativa**
- **zona con exceso de carga positiva**

Molécula de agua es **DIPOLAR**

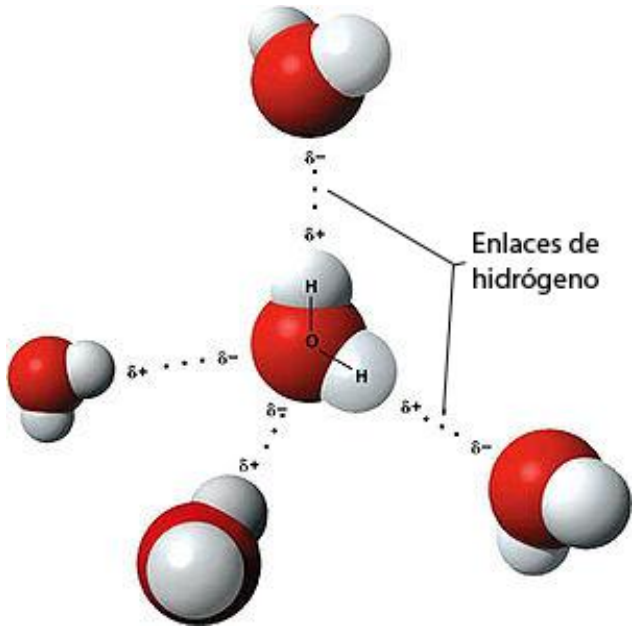


Gran atracción entre las moléculas de agua y se unen entre sí por enlaces de puentes de hidrógeno.

DIPOLARIDAD le confiere propiedades únicas:

- Elevado calor específico y calor de vaporización
- Tensión superficial más elevada que cualquier otro líquido (cohesión y adhesión)
- **Reactividad química**, etc.

Hace que sea una sustancia químicamente muy activa



Disolvente universal

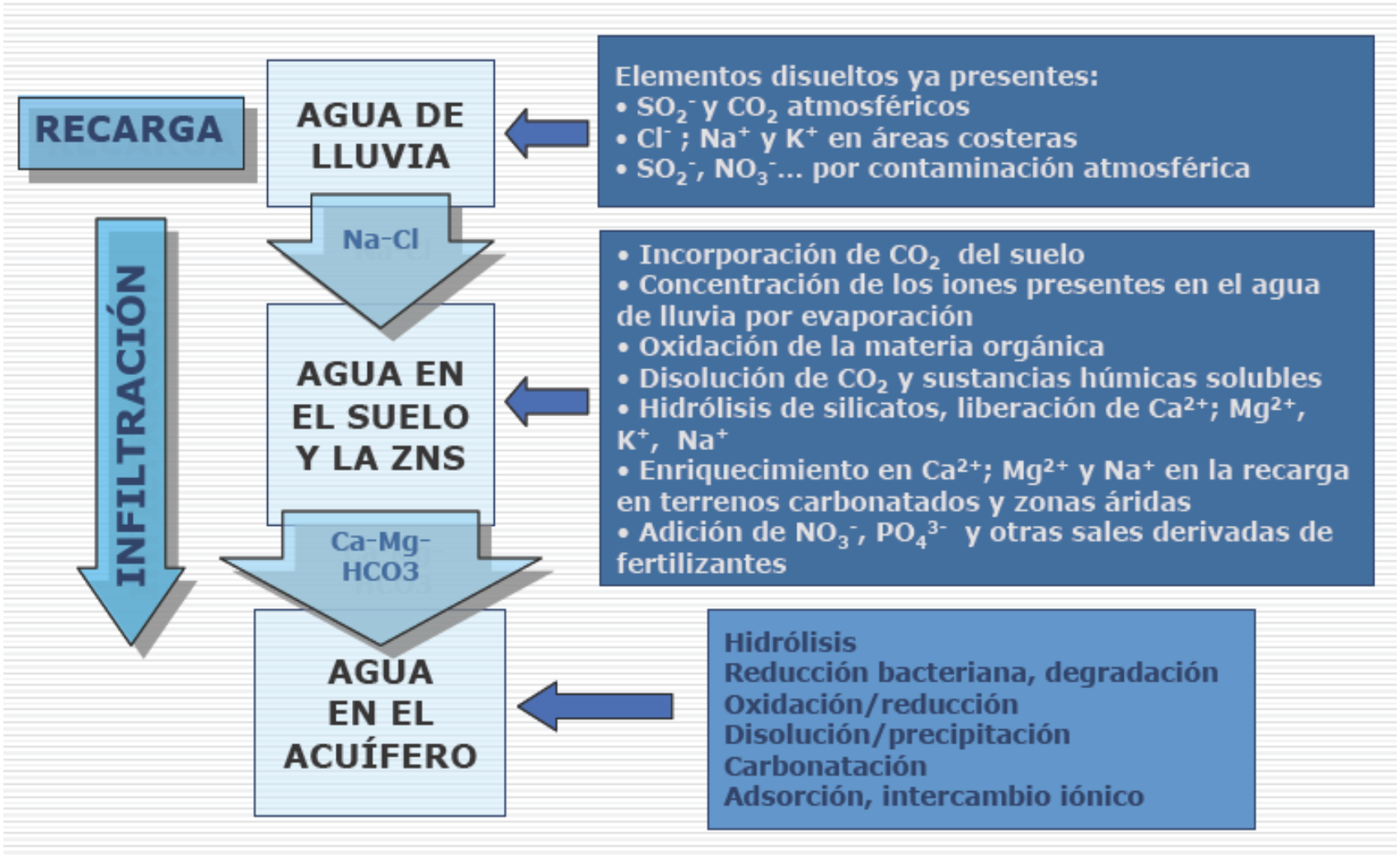
en la naturaleza el agua nunca es pura, siempre va a tener sustancias disueltas

CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS DEL AGUA

Inicialmente, el agua de lluvia que recarga un acuífero tiene **escaso contenido iónico**. En la **escorrentía superficial y a través de las zonas no saturada y saturada**, hay una **interacción agua-fase sólida** por la que el agua va incorporando sustancias químicas como especies.

Las aguas naturales adquieren sus características químicas por reacciones con los sólidos, gases y líquidos con los que se ponen en contacto durante el ciclo hidrogeológico.

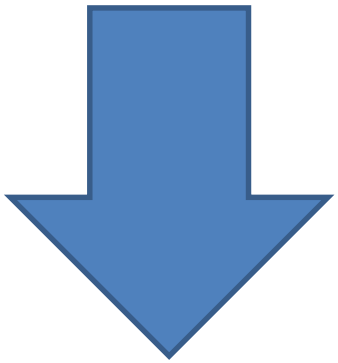
El movimiento del agua y su composición química



Características hidroquímicas del agua subterránea

- Características QUÍMICAS DEL AGUA DE RECARGA
- Características LITOLÓGICAS (mineralogía) del MEDIO (acuífero)
- Tiempo de contacto AGUA/SEDIMENTO

  (*fn* velocidad de circulación del flujo subterráneo)

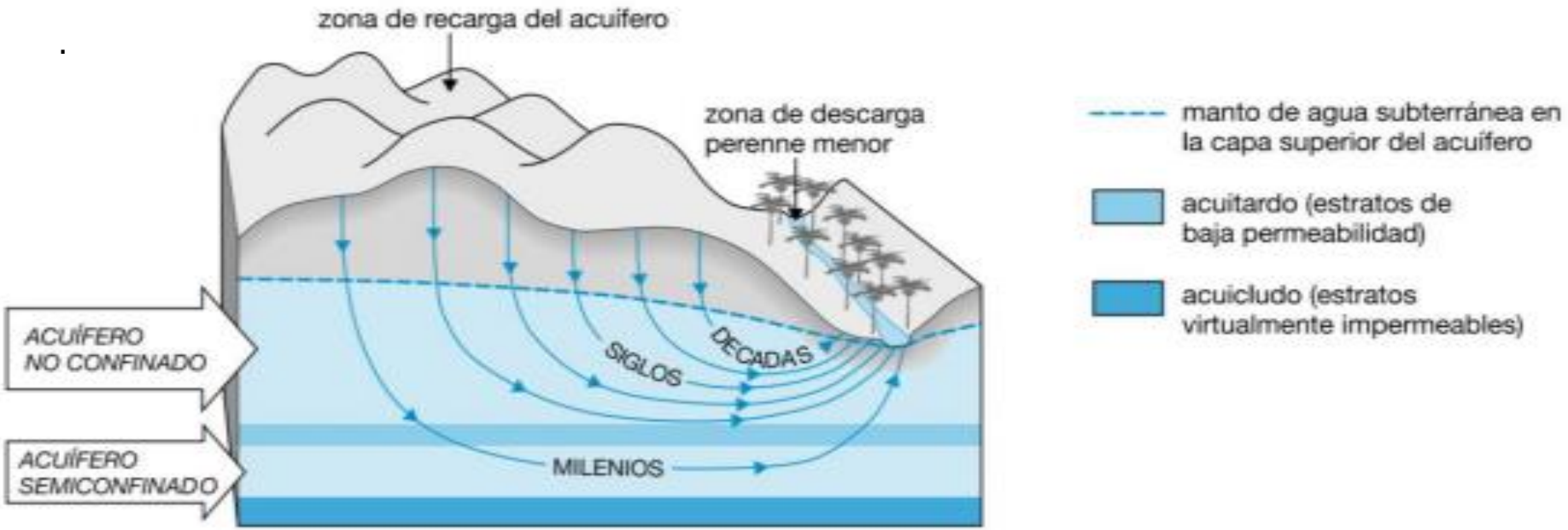


Sedimentología del acuífero / Cambios de facies

Esquema de circulación del agua subterránea

Cuando el agua circula por el terreno y se infiltra para formar parte de los acuíferos, ésta reaparece en superficie, unas veces con un recorrido relativamente corto (circulación local) y otras con un recorrido de cientos o miles de km (circulación zonal y/o regional).

.



Esquema de circulación del agua subterránea

El agua de lluvia se infiltra y pasa por el suelo donde toma una configuración química determinada antes de pasar a formar parte del acuífero.

El agua subterránea, desde el área de recarga, va modificando su composición química debido al contacto con los sedimentos/rocas que atraviesa.

Los **tiempos de contacto** pueden ser variados pero se incrementan a mayor profundidad y menor permeabilidad.

Aguas **profundas** suelen ser más salinas porque las oportunidades para disolver sales son mayores.

Aguas de **circulación local** apenas interaccionan con el terreno y mantienen la configuración adquirida durante la infiltración, salvo que se produzca:

- Mayor concentración por evaporación (si están cerca de la superficie).
- Se encuentren con terrenos que pueden aportar sales con gran facilidad (rocas evaporíticas).

La **composición hidroquímica** está relacionada a las características mineralógicas del sustrato por donde pasa:

- **por silicatos → no hay sales solubles**
- **por terrenos kársticos → aguas bicarbonatadas cálcicas o cálcico-magnésicas.**
- **por sedimentos marinos algo arcillosos → aguas cloruradas sódicas con escaso calcio y magnesio o sulfatadas sódicas.**
- **por sedimentos de origen continental con algo de arcilla → bicarbonatadas cálcicas.**
- **por yesos → sulfatadas cálcicas.**
- **por granitos o granitos alterados → bicarbonatadas sódicas y cálcicas.**
- **por rocas ígneas (poco soluble) → bicarbonatadas cálcicas**

En un agua subterránea natural, la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico.

De acuerdo a la composición química, se pueden diferenciar:

Componentes mayoritarios (~99%):
Aquellos que se encuentran por lo general en **concentraciones mayores a 1 mg/l.** Son los componentes que analizamos y graficamos para caracterizar al agua.

Componentes minoritarios (~1%):
Aquellos que se encuentran por lo general en **concentraciones menores a 1 mg/l**.

Componentes trazas:
Aquellos que están presentes en **concentraciones muy pequeñas** (de algunos µg/l o incluso inferiores) y que son **difícilmente cuantificables** por los métodos de análisis habituales.

Constituyentes mayoritarios (C>1mg/l)

ANIONES	CATIONES
Cloruro	Sodio
Sulfato	Potasio
Carbonato y Bicarbonato	Calcio
	Magnesio

Constituyentes minoritarios (C<1mg/l)

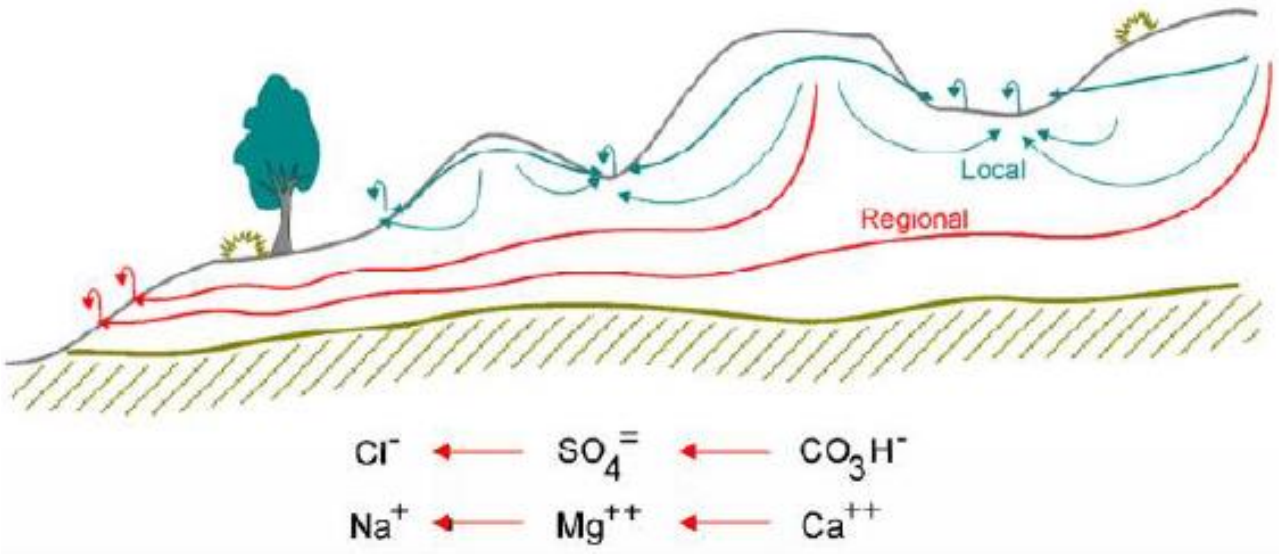
ANIONES	CATIONES
Litio	Amonio
Fluoruros	Manganeso
Bromuros	Estroncio
Boro	Bario

Constituyentes traza (C<<<< 1mg/l)

Dentro de este grupo se pueden mencionar los metales pesados y metaloides: U, Zn, Cu, Pb, As, Se, Sb, Mb, Cd, Ni, Co, etc.

Evolución de la composición química de un agua de circulación regional

El agua de circulación regional tiende a ir aumentando su mineralización hasta irse saturando en los diferentes iones

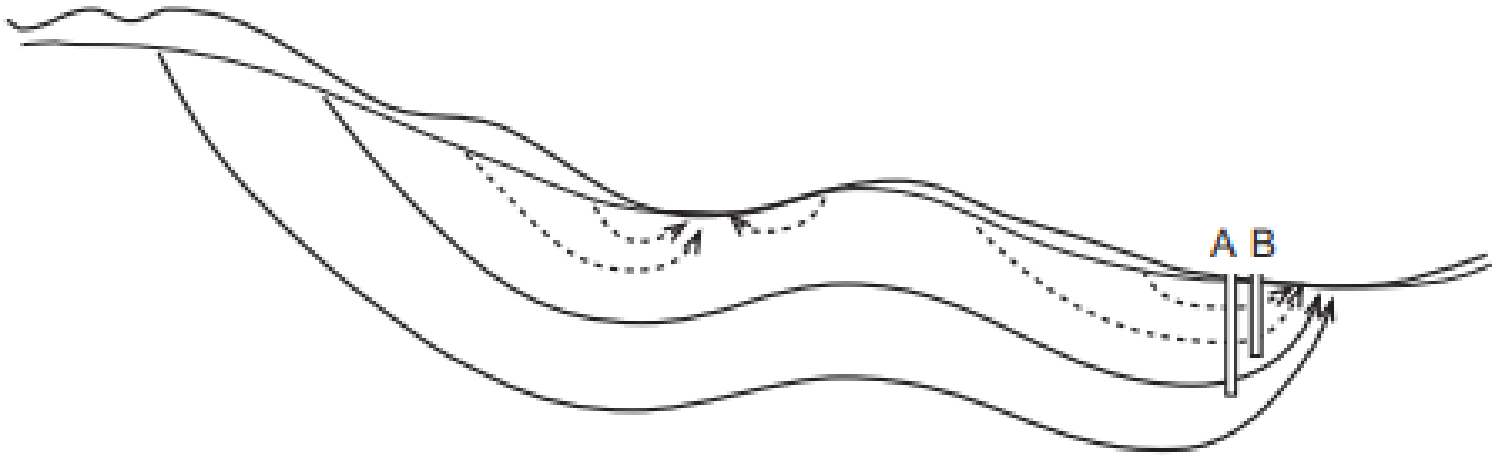


Zonaciones hidroquímicas

HORIZONTALES y VERTICALES

Evolución de la composición química de un agua de circulación regional

En una misma área pueden extraerse aguas de composiciones diferentes a pesar de que la litología sea homogénea





Pozo A: Capta un flujo REGIONAL
Pozo B: Capta un flujo LOCAL

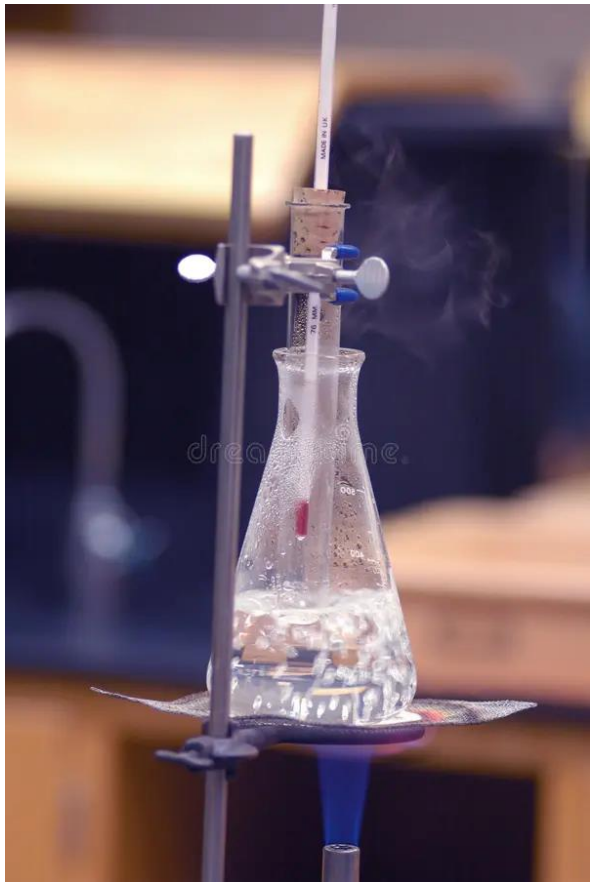
Características físicas y fisicoquímicas

Físicas

- Temperatura (T)
- Conductividad eléctrica (CE)
- Densidad (d)
- Organolépticas

Fisicoquímicas

- STD y Residuo Seco (RS)
- pH
- Alcalinidad
- Dureza
- DBO



Temperatura

En gral. es poco variable, más o menos constante a lo largo del año; responde a la **temperatura atmosférica media** anual del lugar.

Si hay **circulación profunda**, se incrementa 3°C cada 100m de profundidad (**gradiente geotérmico**).

En zonas de recarga las fluctuaciones estacionales pueden ser mayores debido a la influencia de la temperatura del agua que se infiltra en el acuífero.

Conductividad eléctrica

El agua **pura** es un **mal conductor de la electricidad**, pero **aumenta** por los **iones** que tiene **disueltos** (proporcional a la salidad). Se mide en µS/cm o µmhos/cm.

Como **aumenta con la temperatura** (2% cada °C), hay que **tomar la temperatura** cuando **medimos** la conductividad eléctrica. Los datos se expresan a una temperatura estándar (normalmente 20 o 25 ºC).

Conductividad eléctrica

Tipo de agua	CE (μS/cm)
Agua pura	0,04
Agua destilada	0,5 a 5
Agua de lluvia	5 a 50
Aguas potables	< 2.500
Aguas salobres	2.500 a 20.000
Aguas de mar	45.000 a 55.000
Salmueras	>100.000

Sólidos Totales Disueltos y Residuo Seco

Sólidos Totales Disueltos (STD): es el **residuo** que queda después de **evaporar** una **muestra** de agua previamente filtrada (suma de todos los iones presentes), expresado en **mg/l**.

Residuo Seco (RS): es el **peso del material** resultante de **secar una muestra de 1 litro** en una estufa a una **temperatura determinada** (110°C o 180°C). Es similar a STD.

Hay ciertos iones como HCO_3^-, Mg^{++}, Cl^- y NO_3^- que pueden volatilizarse parcialmente. Por lo que el **RS siempre** va a ser **menor** que los **STD**.

$$\textbf{STD (ppm)} \approx \textbf{RS} + \frac{1}{2}\textbf{HCO}_3^-$$

STD y RS se pueden **estimar**, de forma aproximada, a partir de la **conductividad eléctrica** del agua.

$$\textbf{STD (mg/l)} = \textbf{a x CE (µS/cm)}$$

a: coeficiente de ajuste con valores entre 0,6 y 0,9. (Mza. 0,65/0,7)

$$\textbf{CE (µS/cm)} = \textbf{1,4 x RS (mg/l)}$$

pH

Es una medida de la **acidez** del agua. En las aguas subterráneas normalmente vamos a tener valores de pH entre 5,5 y 8,5.

Controla la **solubilidad** de muchos minerales y los procesos de adsorción.

Se debe **medir en el momento** de la toma de muestra, ya que **varía con la temperatura**; se refiere a una temperatura estándar (25°C).

Alcalinidad

Indica la **capacidad del agua para neutralizar ácidos**, y se refiere principalmente a la cantidad de carbonatos y bicarbonatos presentes.

Se expresa en mg/l de CO_3Ca.

Dureza

Indica la capacidad del agua de producir incrustaciones.

Se refiere principalmente a la cantidad de iones metálicos presentes (especialmente de Ca^{2+} y Mg^{2+}).

Se suele expresar como mg/l de $CaCO_3$ o como grados franceses
(10 mg/l de $CaCO_3$ = 1 °F).

Se puede diferenciar entre:

- dureza **temporal**, asociada a los carbonatos y bicarbonatos.
- dureza **permanente**, que sería la cantidad de Ca y Mg en el agua después de precipitar los carbonatos y bicarbonatos.

DBO

(Demanda Bioquímica de Oxígeno)

Cantidad de **oxígeno disuelto** que los **microorganismos** necesitan para **degradar la materia orgánica** presente en una muestra de agua, mediante procesos biológicos aerobios.

Se debe referir a un intervalo de tiempo (generalmente 5 días)

Un **valor alto** de DBO indica una **mayor contaminación por materia orgánica**, lo que puede agotar el oxígeno disuelto en cuerpos de agua y perjudicar la vida acuática.

Se mide en **miligramos de oxígeno por litro** (mg/l) y se utiliza como un parámetro para evaluar la calidad del agua, **especialmente de aguas residuales**.

Representación gráfica

El estudio de los análisis químicos puede simplificarse con el empleo de **diagramas y mapas**, sobre todo cuando se necesita comparar varios análisis de agua de un mismo lugar en épocas diferentes o de lugares diferentes.

Tiene por objeto resaltar la **composición iónica** de un agua para **compararla** con otras.

- **Diagramas** (variación muestral).
- **Mapas** o planos hidroquímicos (distribución espacial).

Análisis químico

Balance iónico

Mide la diferencia entre el total de aniones y cationes, expresados en miliequivalentes por litro (meq/l), determinados analíticamente.

$$error\ (\%) = \frac{\sum cationes - \sum aniones}{(\sum cationes + \sum aniones)/2} * 100$$

$$error\ (\%) = 200\ \frac{\sum cationes - \sum aniones}{(\sum cationes + \sum aniones)}$$

Conductividad eléctrica (μS/cm)	50	200	500	2000	>2000
Error aceptable (%)	± 30	± 10	± 8	± 4	± 4

Valores en **meq/l**

Los meq/l son necesarios porque las **reacciones químicas** se producen **equivalente a equivalente** (un equivalente de A reacciona con un equivalente de B), y en el agua la cantidad de meq de aniones es igual a la de meq de cationes.

(mg/l) → Suma de sales disueltas

(meq/l) → Suma de iones disueltos

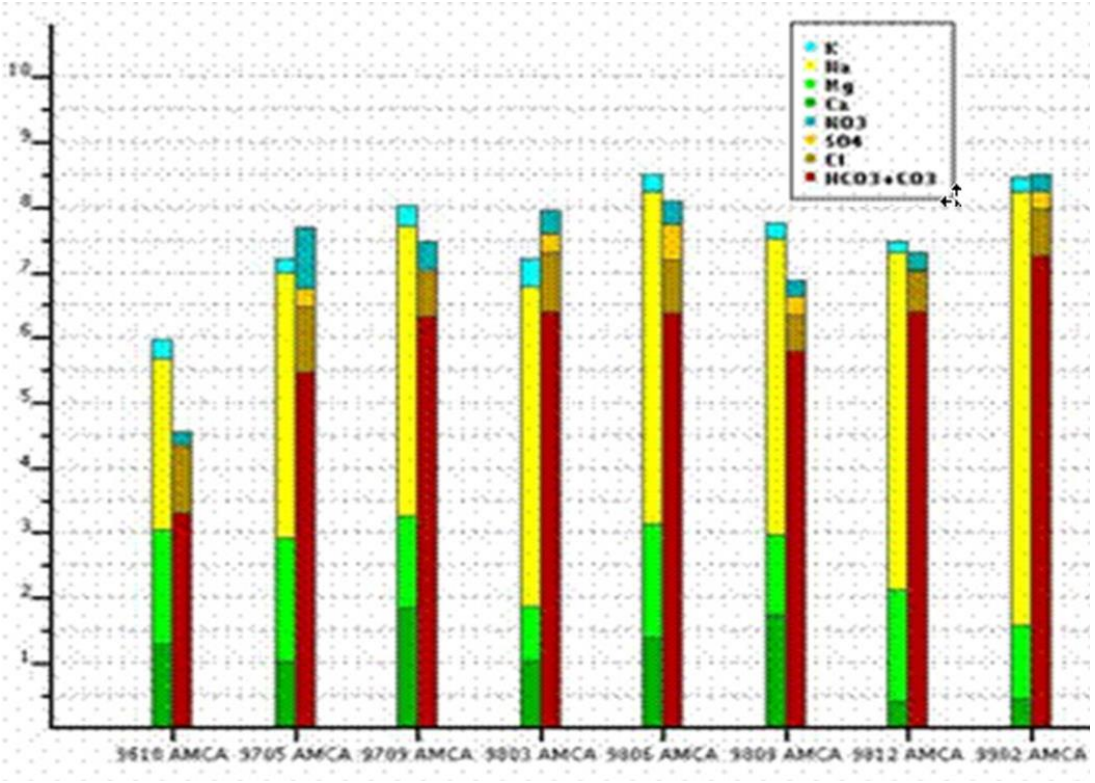
Diagramas columnares o diagramas de Collins.

Se disponen **dos columnas**, una con los **cationes** en el orden Ca, Mg, Na, (K); en la otra se agrupan los **aniones** en el orden CO_3H+CO_3, SO_4, Cl, (NO_3).

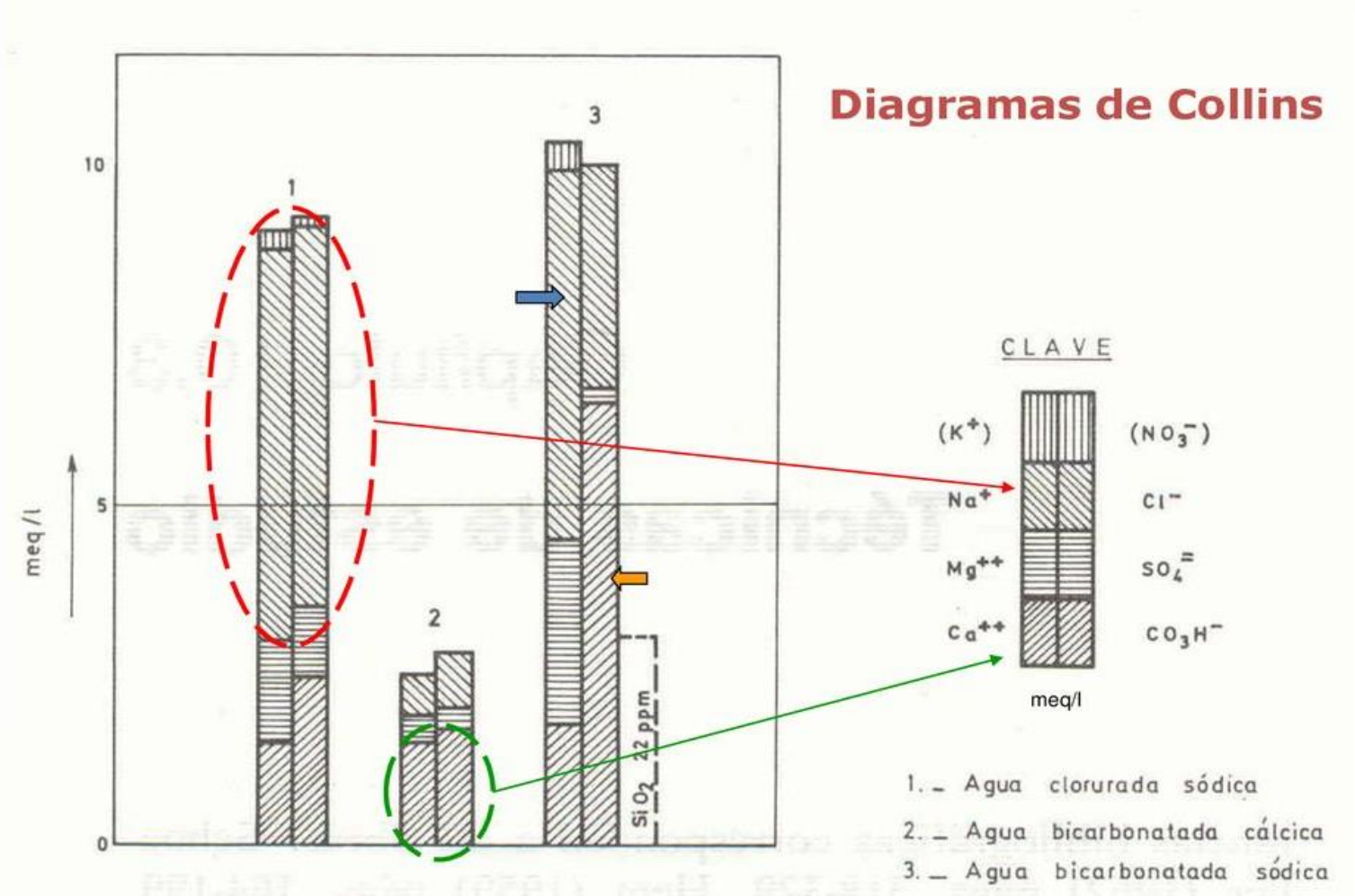
Se pueden asociar aniones con cationes porque están en **orden de solubilidad**.

Las alturas de las columnas son teóricamente iguales (error en el análisis).

Valores en **meq/l**.



Diagramas columnares o diagramas de Collins.



Diagramas Triangulares

Son ideales para representar tres componentes.

Los iones deben estar reducidos a %. (para obtener la proporción de cada componente)

A cada vértice corresponde el 100% (componentes puros).

Lo más usual es expresar las concentraciones en **% meq/l**

J: mezcla binaria (sobre un lado del triángulo)
M: mezcla ternaria (interior del triángulo)

(generalmente no se usan)

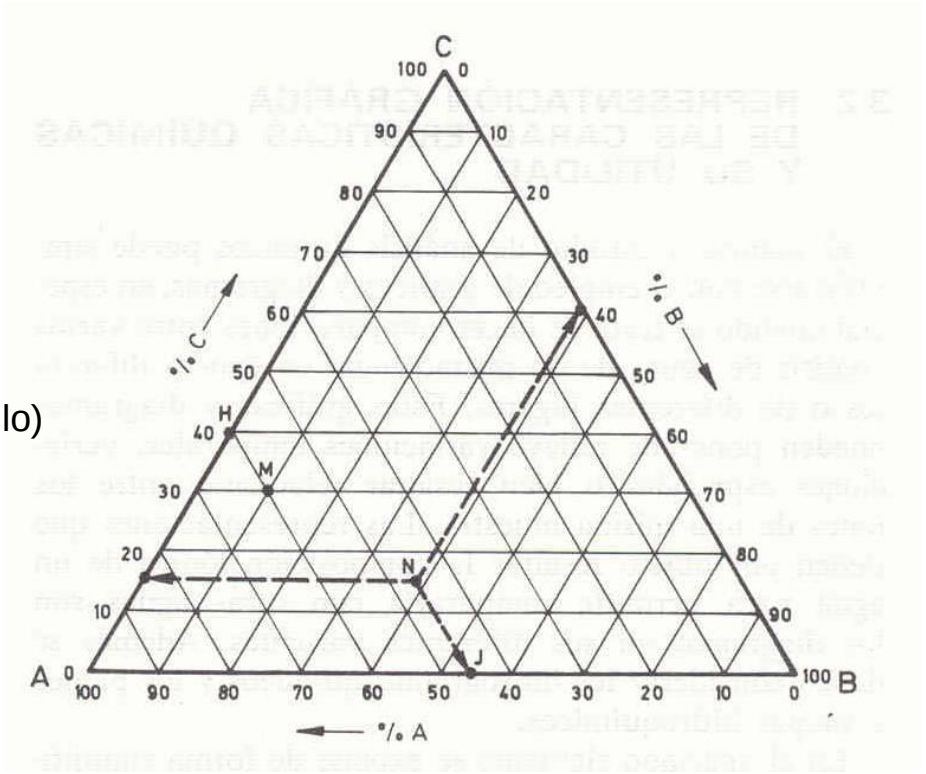
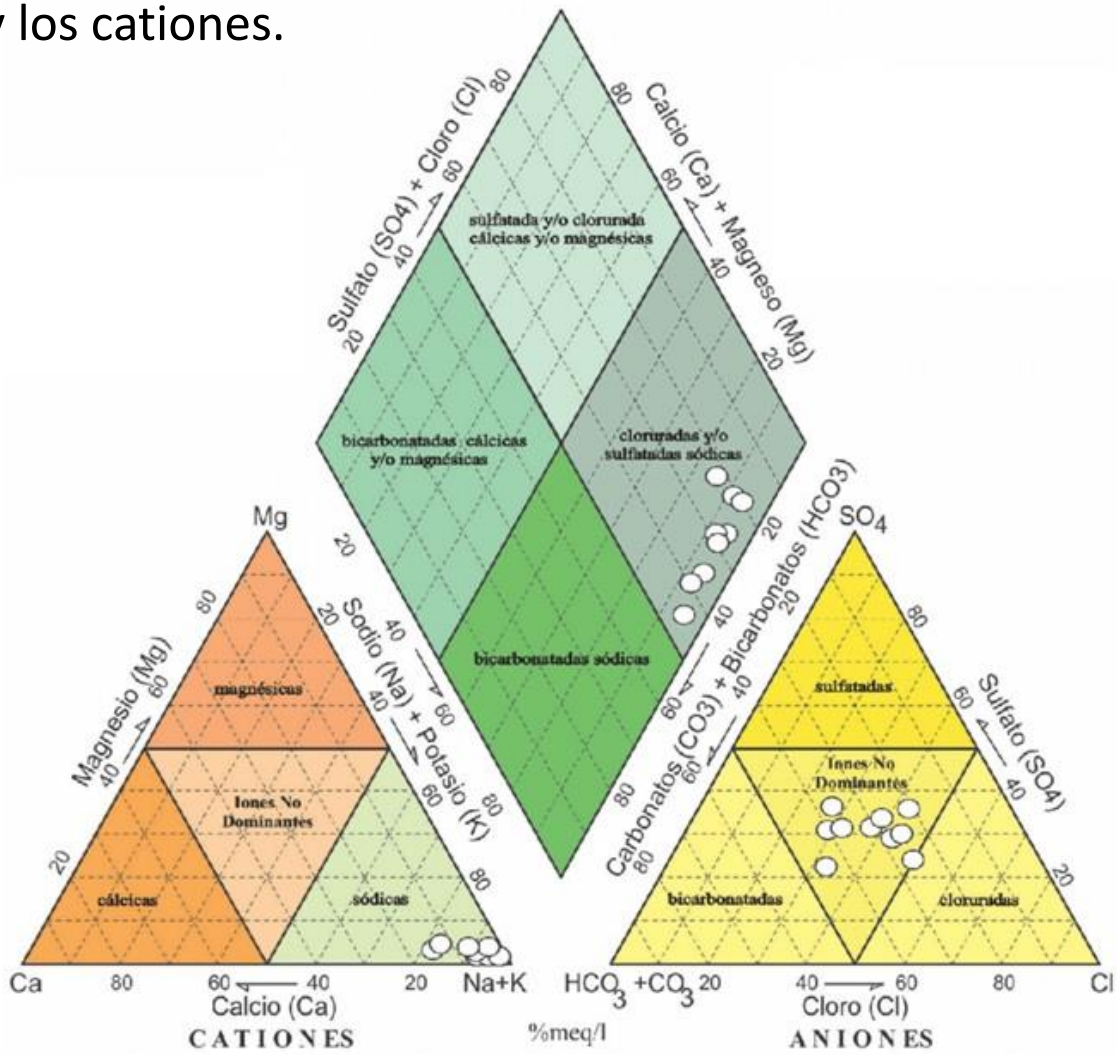


Diagrama de Piper

Utiliza dos triángulos; uno para los **aniones** y otro para los **cationes** con un campo central romboidal donde se representa un tercer punto deducido de los que representan los aniones y los cationes.

Las aguas similares geoquímicamente quedan agrupadas en áreas bien definidas.



Classification of Water

- *Ca-SO_4 waters* - typical of gypsum ground waters and mine drainage
- *Ca-HCO_3 waters* - typical of shallow, fresh ground waters
- *Na-Cl waters* - typical of marine and deep ancient ground waters
- *Na-HCO_3 waters* – typical of deeper fresh ground waters influenced by ion exchange

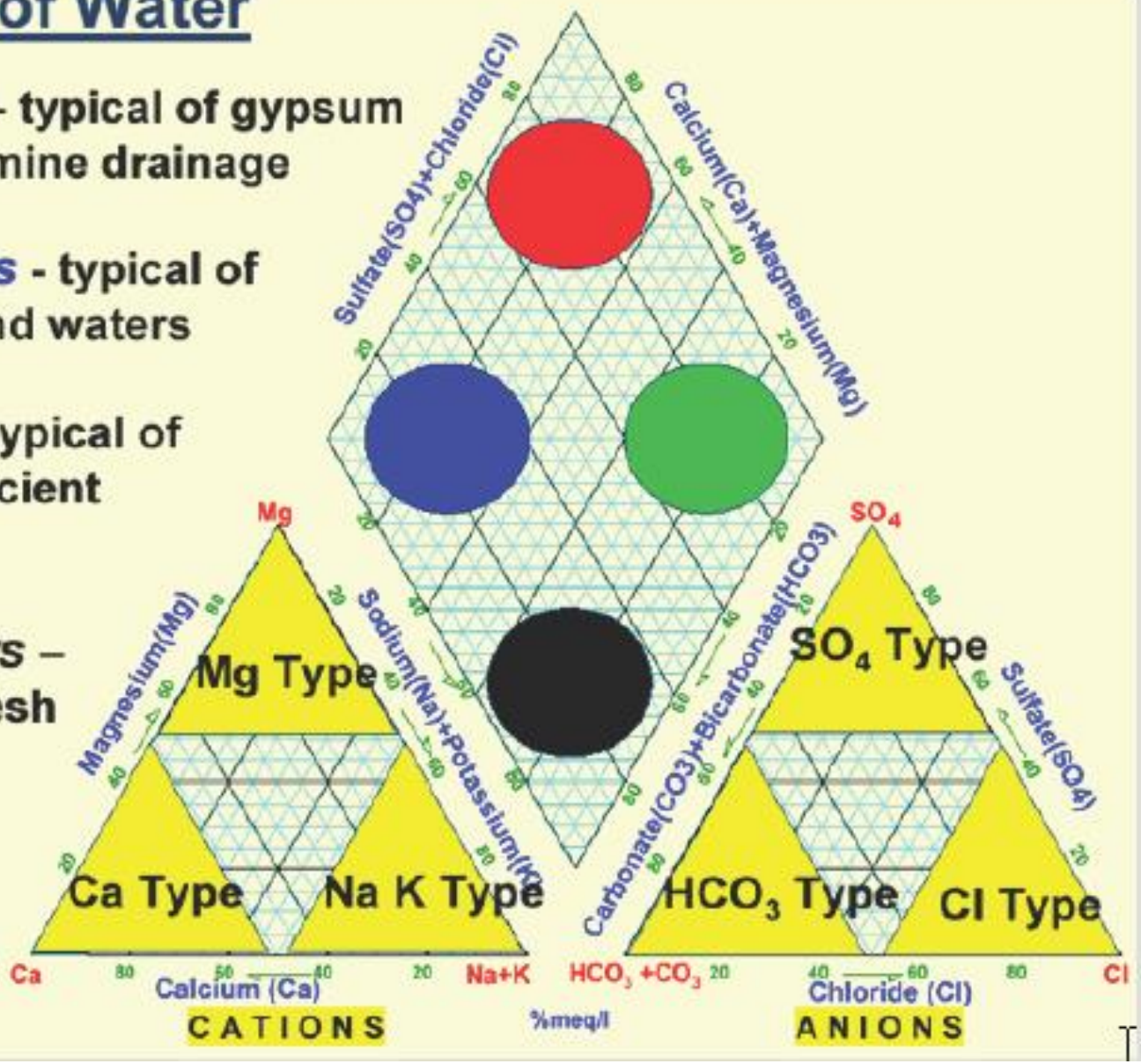
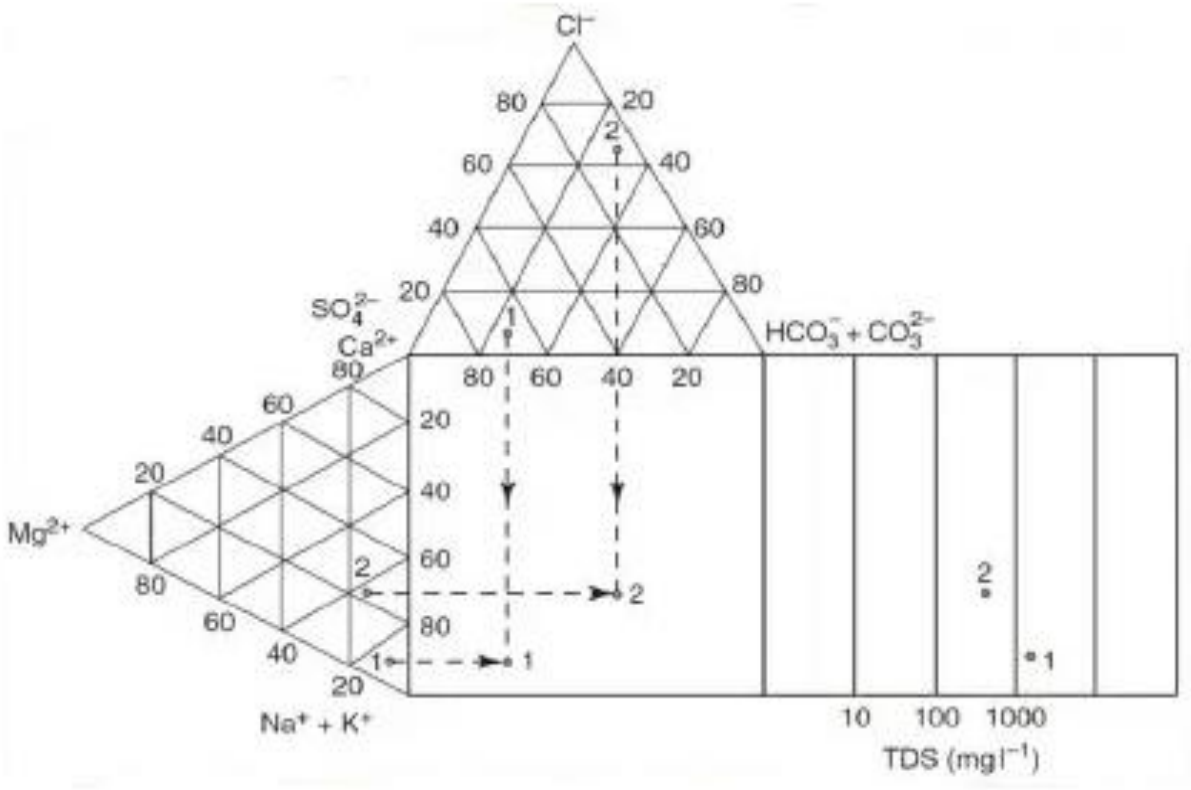


Diagrama de Durov

Este diagrama es una modificación de los Diagramas de Pipper.

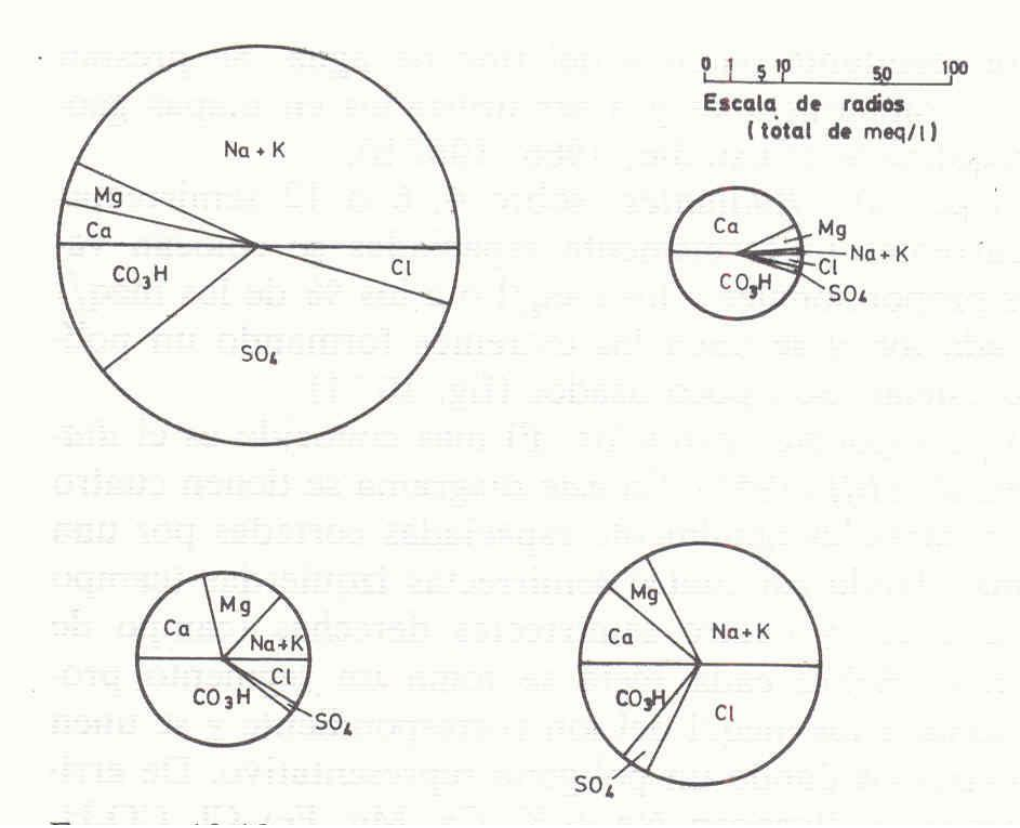
En el diagrama se ubican los puntos de manera similar al Diagrama de Piper.

Posteriormente estos se proyectan a un cuadrado central y de allí a otro rectángulo aledaño en el que se puede ubicar cualquier otra variable (CE, pH, STD).



Diagramas circulares

Se dibuja un circulo de **radio proporcional al residuo seco o al total de meq/l disueltos**. Este circulo se divide en sectores proporcionales a los % de los diversos componentes. Si se hace con los iones expresados en meq/l, la mitad del circulo es para los cationes y la otra mitad para los aniones.



- Se adaptan bien para ser usados en mapas hidroquímicos.
- No permiten deducir relaciones entre componentes.
- Cada diagrama representa un análisis.

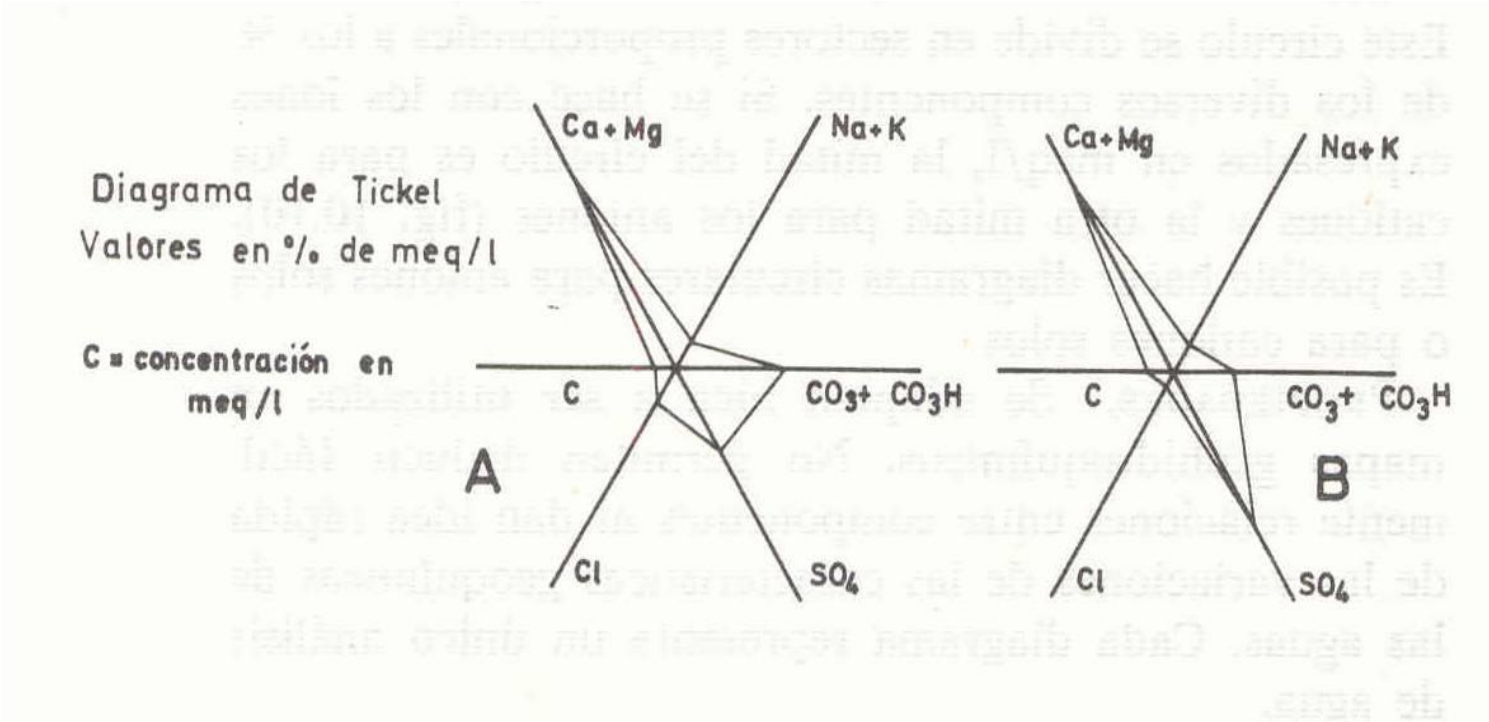
Diagramas Radiales de Tickel

Consiste en tomar sobre semirrectas convergentes **segmentos proporcionales** a **cada ion** y unir los extremos dando así un polígono.

Sobre cada semirrecta se toma un solo ion o bien un catión y un anión simultáneamente.

La forma de la figura resultante da idea del tipo de agua.

Se prestan bien a ser utilizados en mapas hidroquímicos

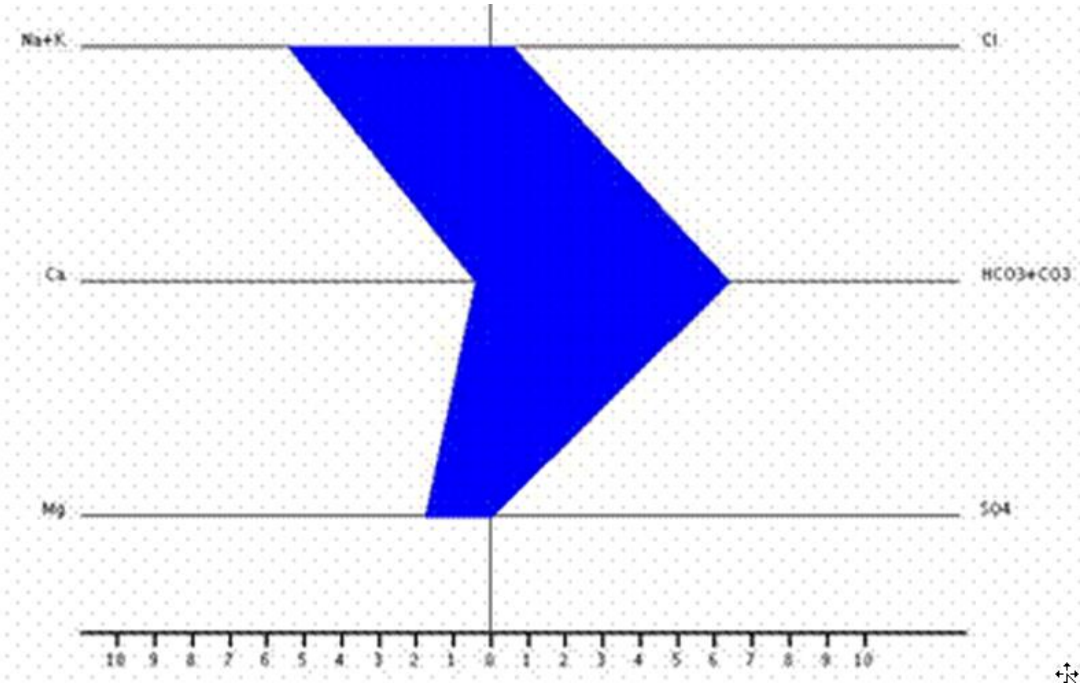


Diagramas Poligonales

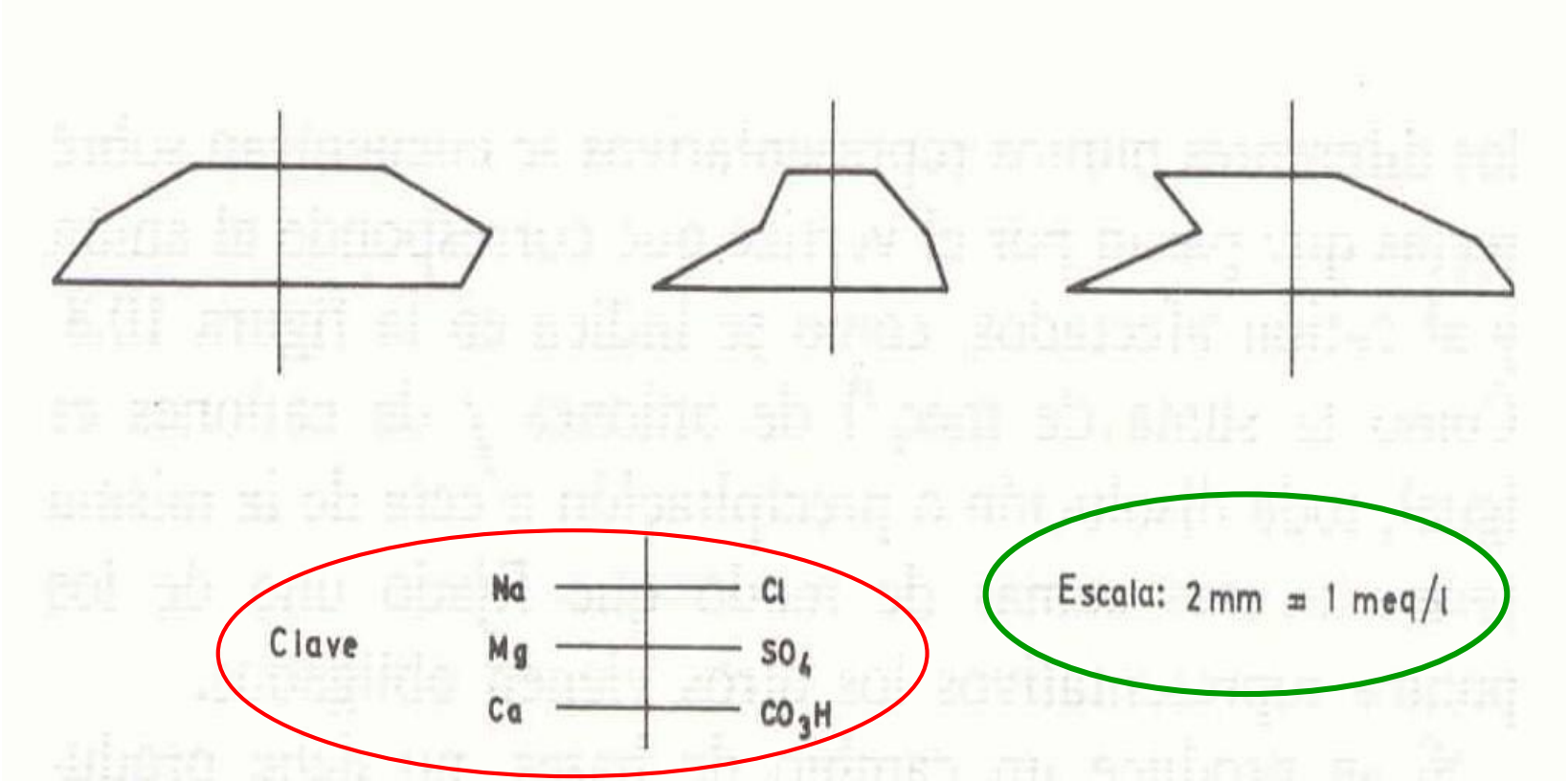
Se prestan bien a ser utilizados en mapas hidroquímicos. Los más usados son los **Diagramas de Stiff**, que cuenta con **3 rectas paralelas igualmente espaciadas** cortadas por una **normal** dando así **3 semirrectas izquierdas** (campo de **cationes**) y **3 semirrectas derechas** (campo de **aniones**).
Sobre cada recta se toma un segmento proporcional a los **meq/l** del ion correspondiente y se unen los extremos dando un **polígono representativo**.

Se puede usar con %meq/l, en este caso no permite observar concentraciones absolutas pero si comparar.

El tamaño es proporcional a la CE



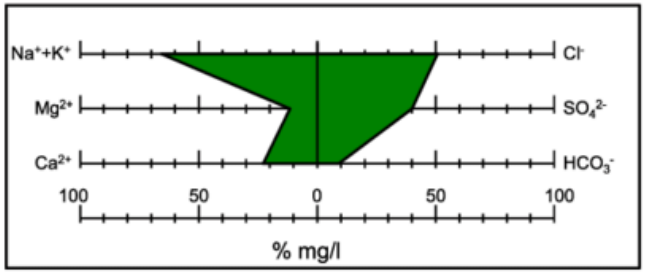
Diagramas de Stiff



Muy utilizados en mapas hidroquímicos

Diagramas de Stiff

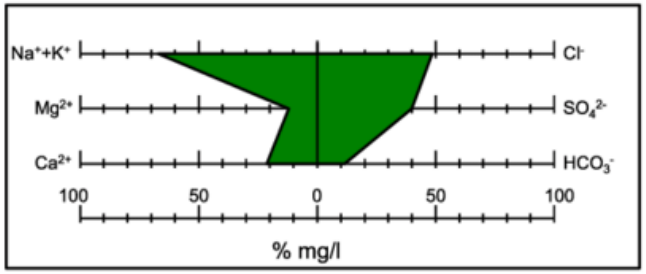
AB-1



	mg/l	meq/l	%mg/l
Na+K	1152,487	49,69	65,72
Mg	201,898	16,61	11,51
Ca	399,222	19,92	22,77

	mg/l	meq/l
Cl	1865,388	52,62
SO4	1471,095	30,63
HCO3	335,61	5,50

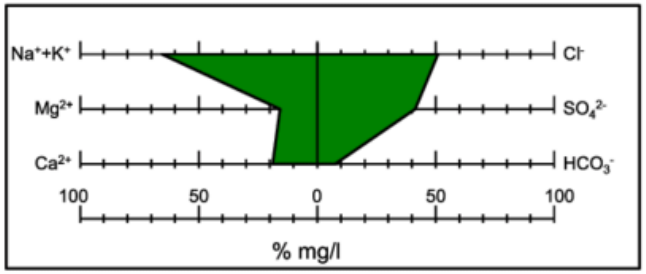
AB-2



	mg/l	meq/l	%mg/l
Na+K	1594,628	68,97	66,81
Mg	286,342	23,55	12,00
Ca	505,751	25,24	21,19

	mg/l	meq/l
Cl	2538,337	71,61
SO4	2087,157	43,45
HCO3	610,2	10,00

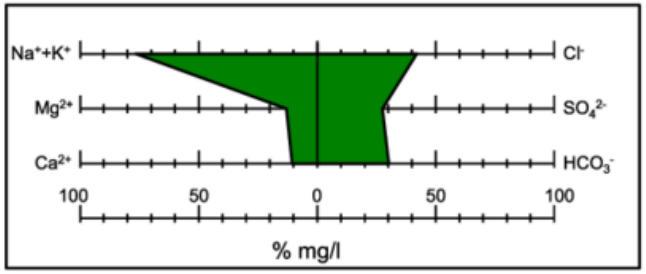
AB-3



	mg/l	meq/l	%mg/l
Na+K	2384,326	102,72	65,51
Mg	570,968	46,97	15,69
Ca	684,402	34,15	18,80

	mg/l	meq/l
Cl	4071,138	114,85
SO4	3305,805	68,83
HCO3	610,2	10,00

AB-LI



	mg/l	meq/l	%mg/l
Na+K	4667,639	201,85	76,51
Mg	790,29	65,01	12,95
Ca	643,027	32,09	10,54

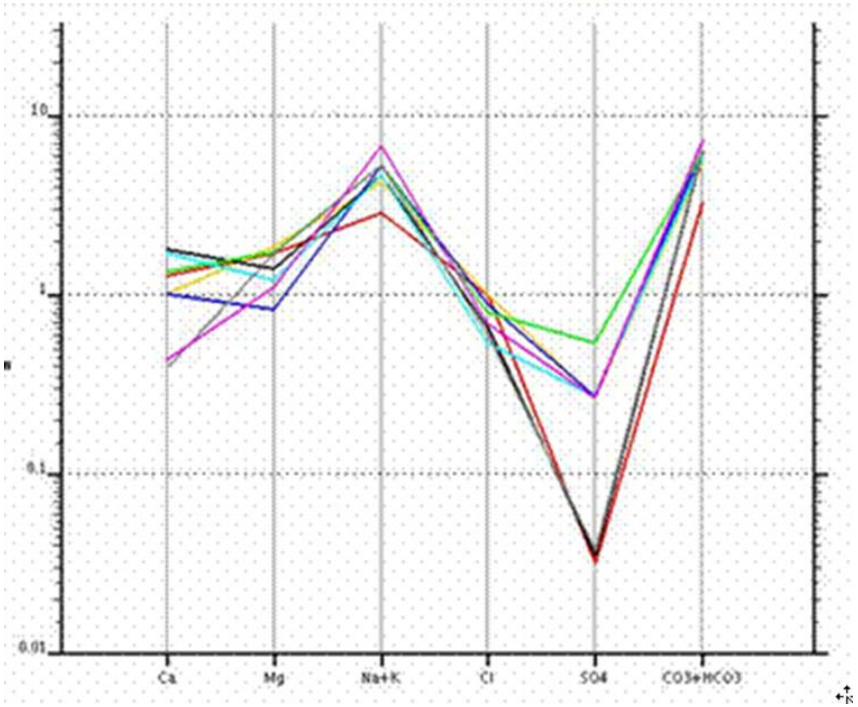
	mg/l	meq/l
Cl	5932,197	167,35
SO4	3892,159	81,03
HCO3	4271	70,00

Diagramas de columnas verticales logarítmicas. Diagrama de Schoeller-Berkaloff

Consta de un eje de categorías (eje x) y se disponen varias **semirrectas verticales** paralelas **igualmente espaciadas** donde cada vertical corresponde a un ion (generalmente mayoritario).

En el eje de **ordenadas** se marca, en **escala logarítmica**, la concentración de cada ion (en meq/l).

Uniendo los puntos determinados para cada ion en función de su concentración se obtiene una línea quebrada que representa a una muestra determinada.



Una **ubicación superior** de la línea dentro del gráfico indica una **mayor concentración** de la muestra y sus **picos** permiten identificar los **iones dominantes**.
Si bien pueden incluirse varias muestras en un mismo gráfico, éste puede resultar confuso cuando contiene demasiadas

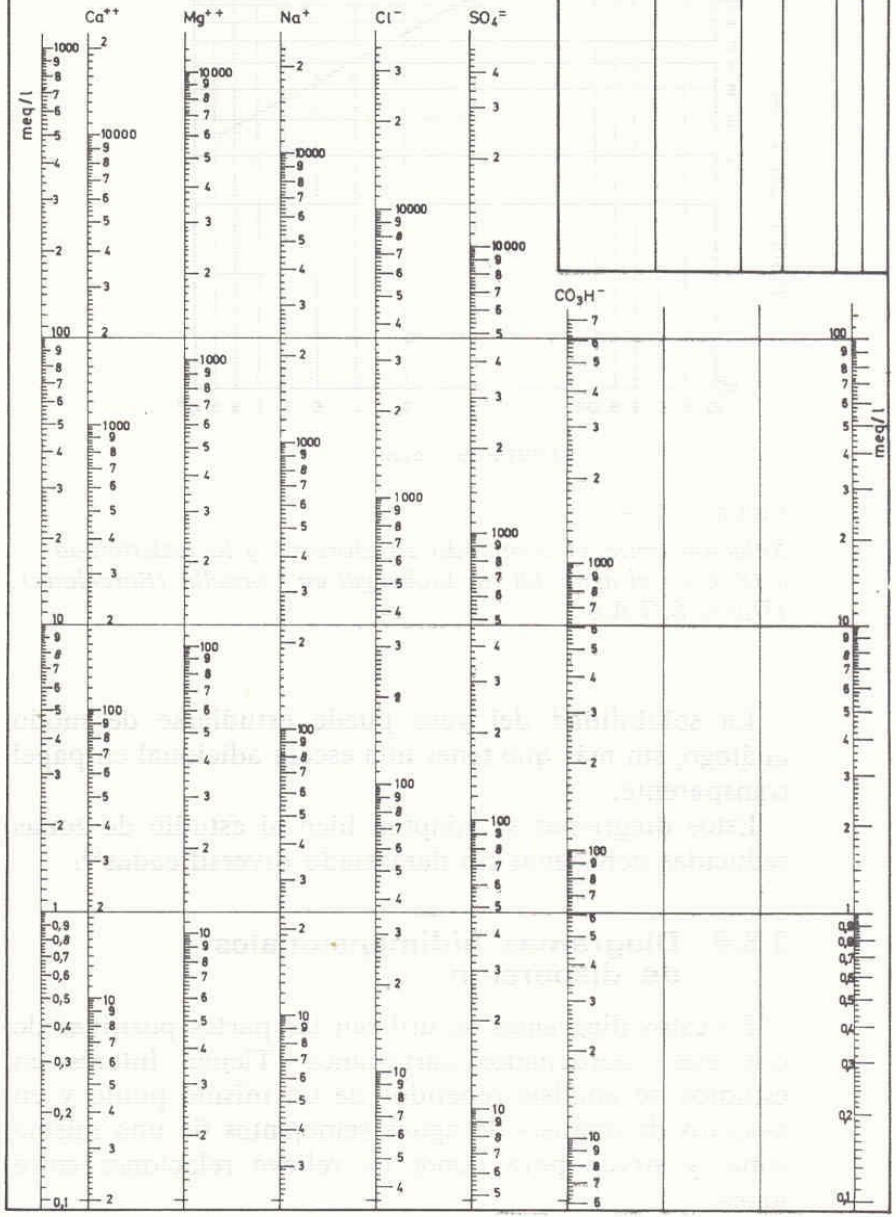
COMISARIA DE AGUAS DEL PIRINEO ORIENTAL

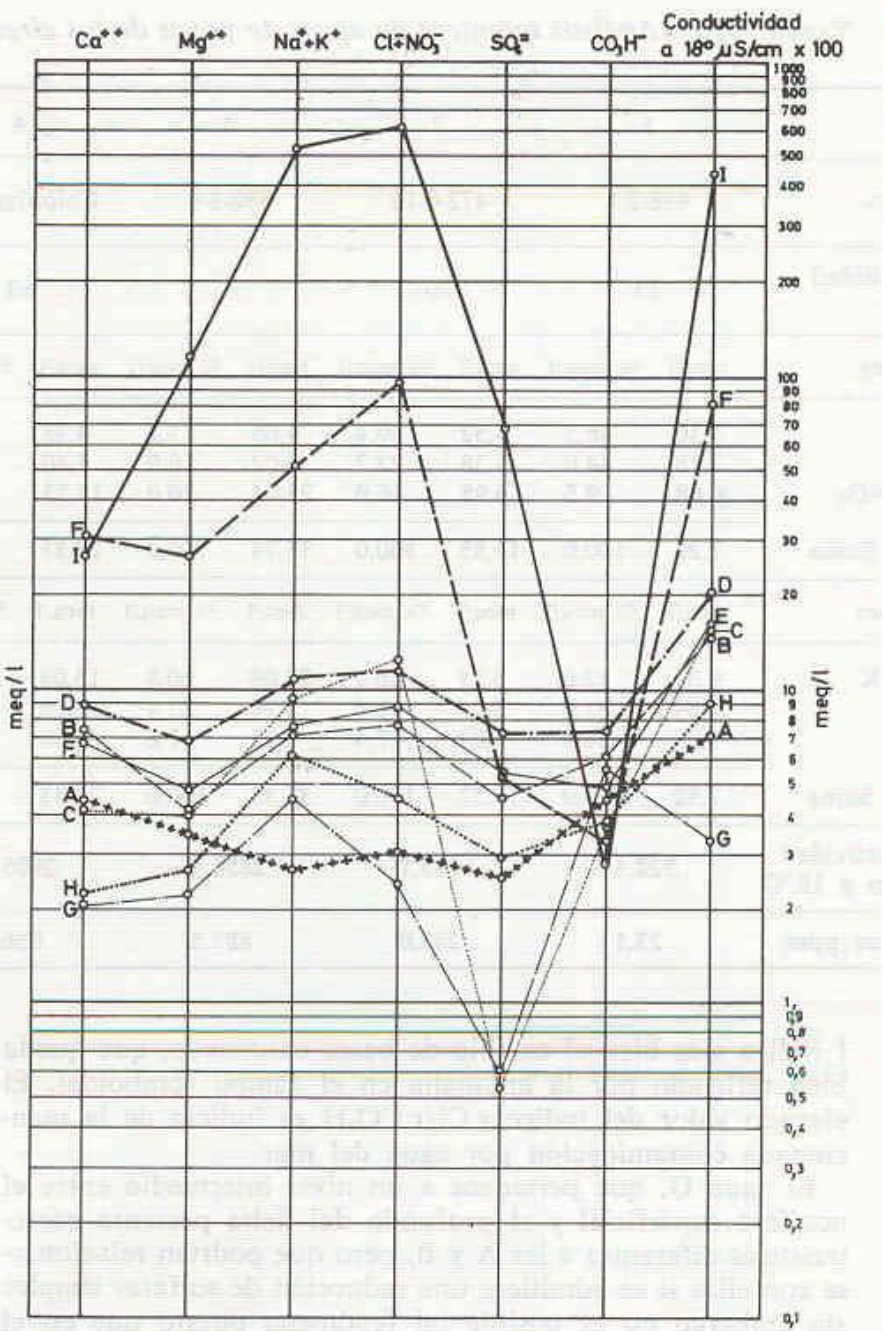
Diagrama logarítmico de : SCHOELLER – BERKALOFF

Lugar : _____ Fecha _____

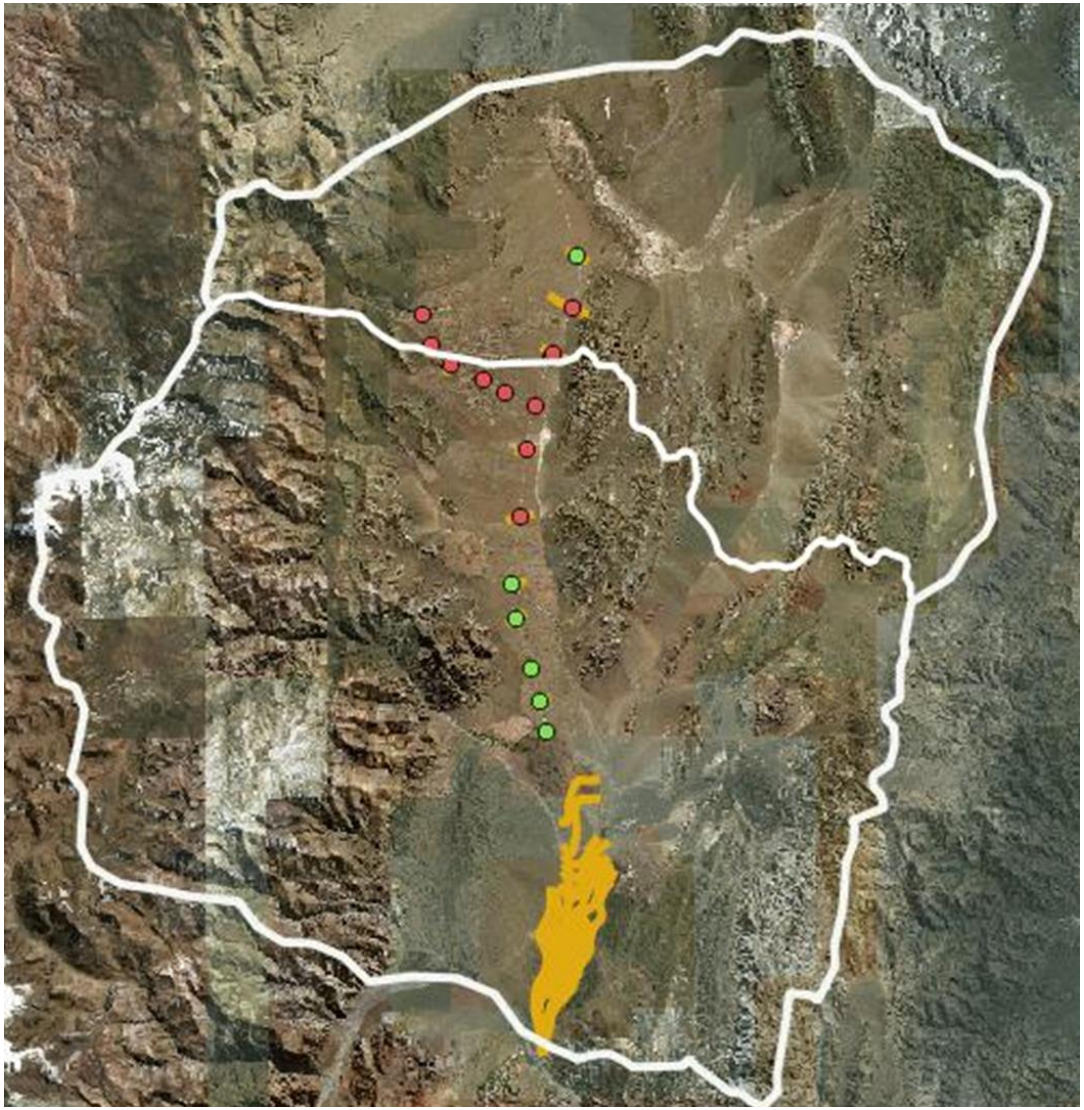
Observaciones : _____

LEYENDA					
Descripción	Toponimia	R_s ppm	C µS/cm	Dt	pH



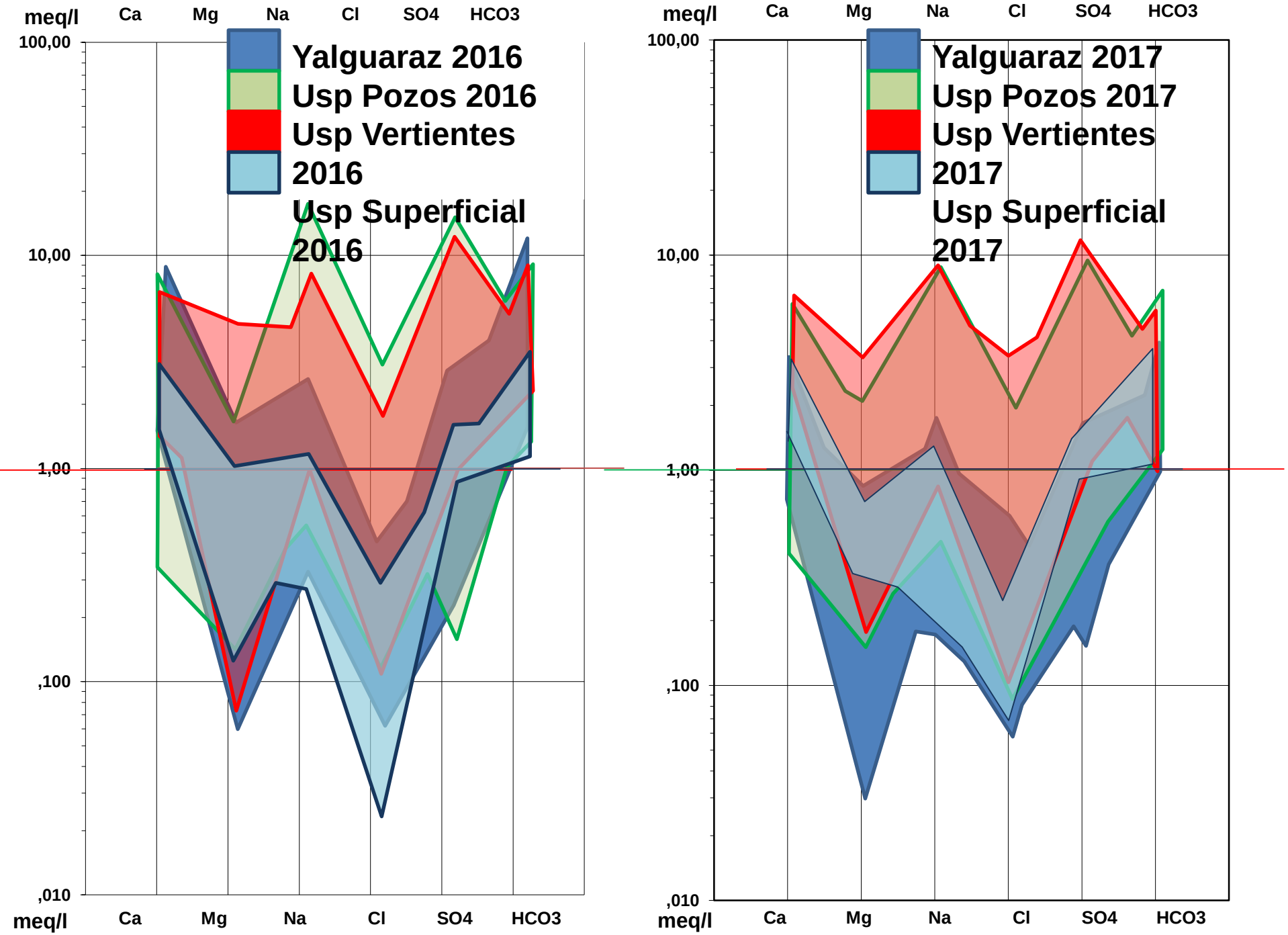


CUENCAS USPALLATA Y YALGUARAZ



YALGUARAZ

USPALLATA

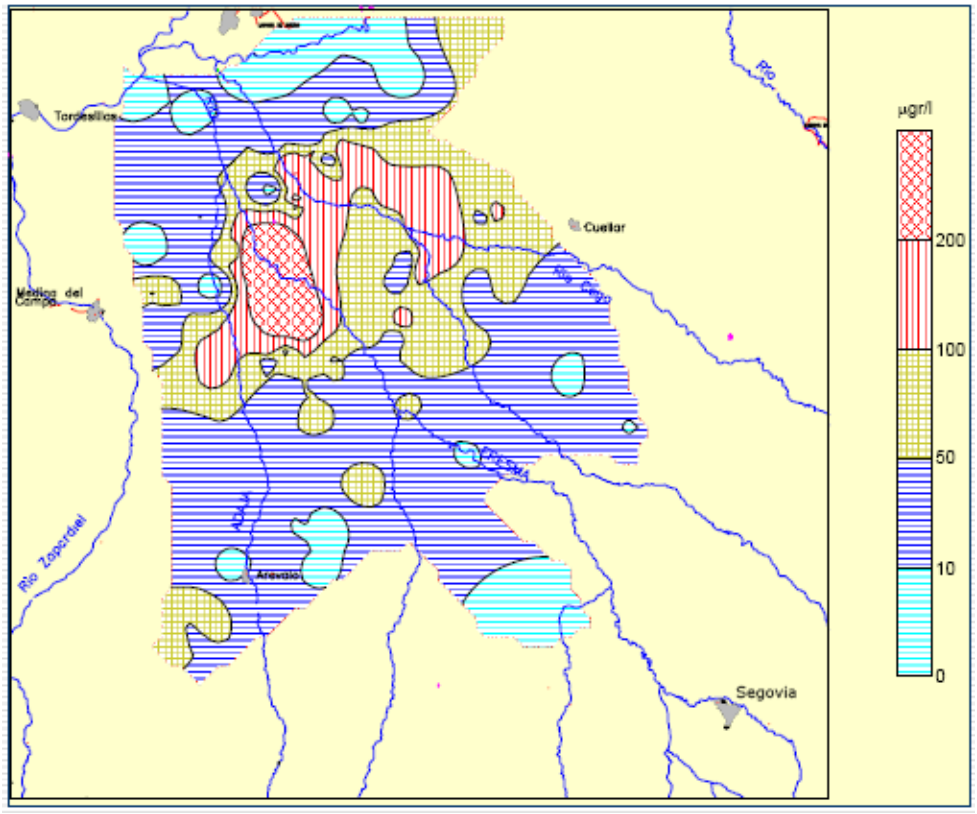

meq/l
Ca
Mg
Na
Cl
SO4
HCO3
100,00
10,00
1,00
,100
,010
Yalguaraz 2016
Usp Pozos 2016
Usp Vertientes 2016
Usp Superficial 2016
meq/l
Ca
Mg
Na
Cl
SO4
HCO3
100,00
10,00
1,00
,100
,010
Yalguaraz 2017
Usp Pozos 2017
Usp Vertientes 2017
Usp Superficial 2017
meq/l
Ca
Mg
Na
Cl
SO4
HCO3

Mapas (variación espacial)

Mapas de Isolíneas

Incluyen líneas que representan puntos con un mismo valor del parámetro analizado.

Permiten evaluar la tendencia (gradiente) regional de determinado parámetro e identificar las áreas o sectores ‘anómalos’ con respecto a esa tendencia regional.



Planos hidroquímicos

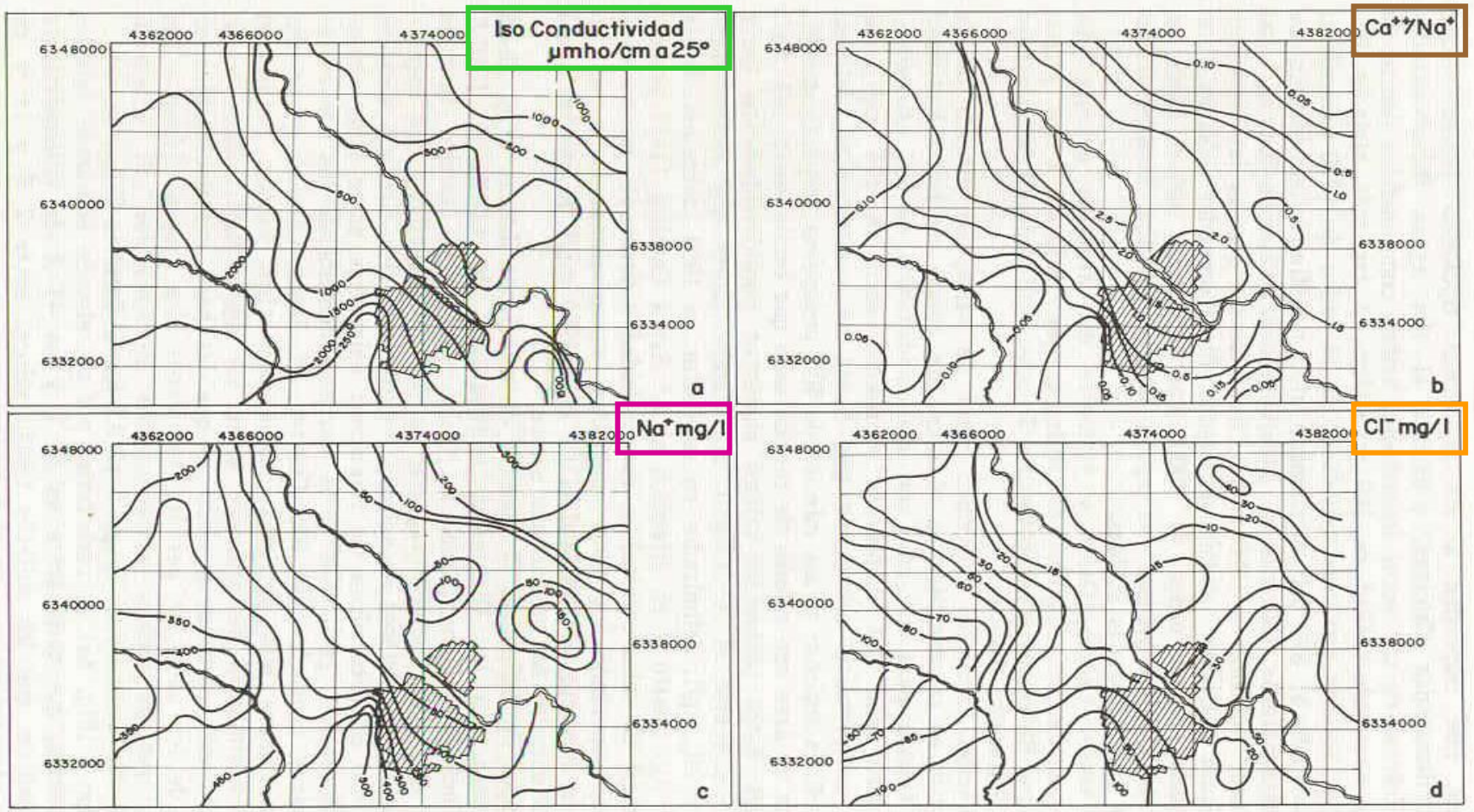
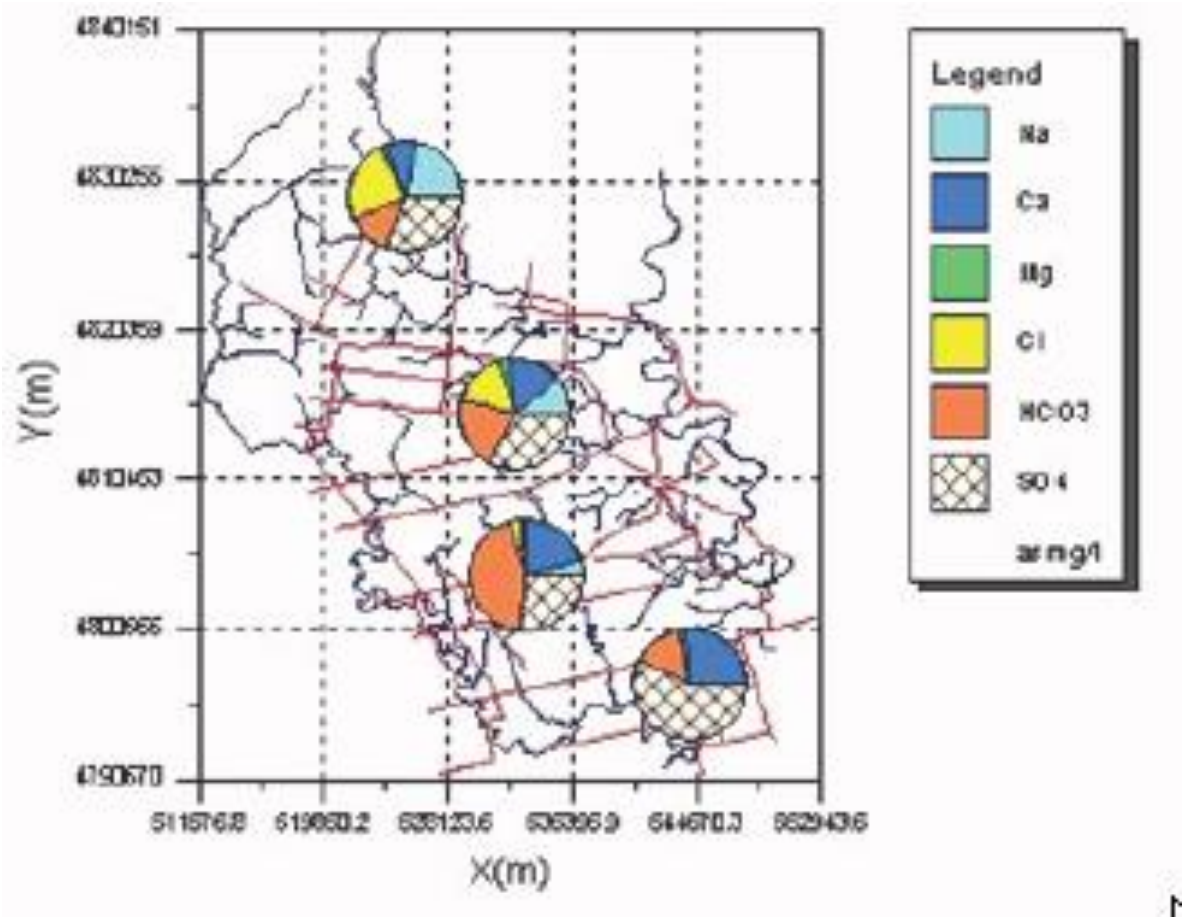


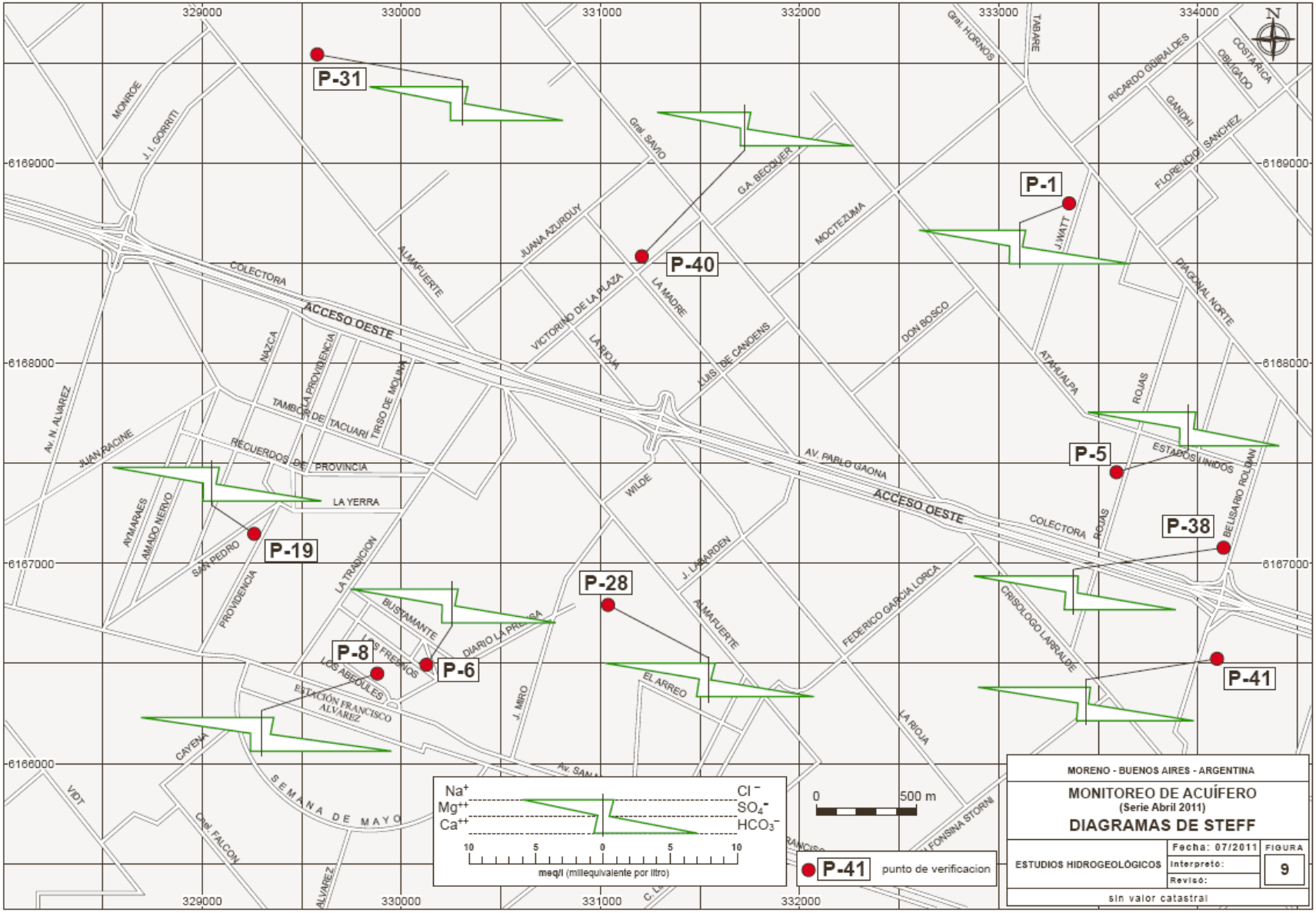
Fig. 5a. Mapa de curvas de Isocónductividad.
Fig. 5b. Mapa de Isorelaciones Ca^{++}/Na^{+}.
Fig. 5c. Mapa de Isotenor de Na^{+}.
Fig. 5d. Mapa de Isotenor de Cl .

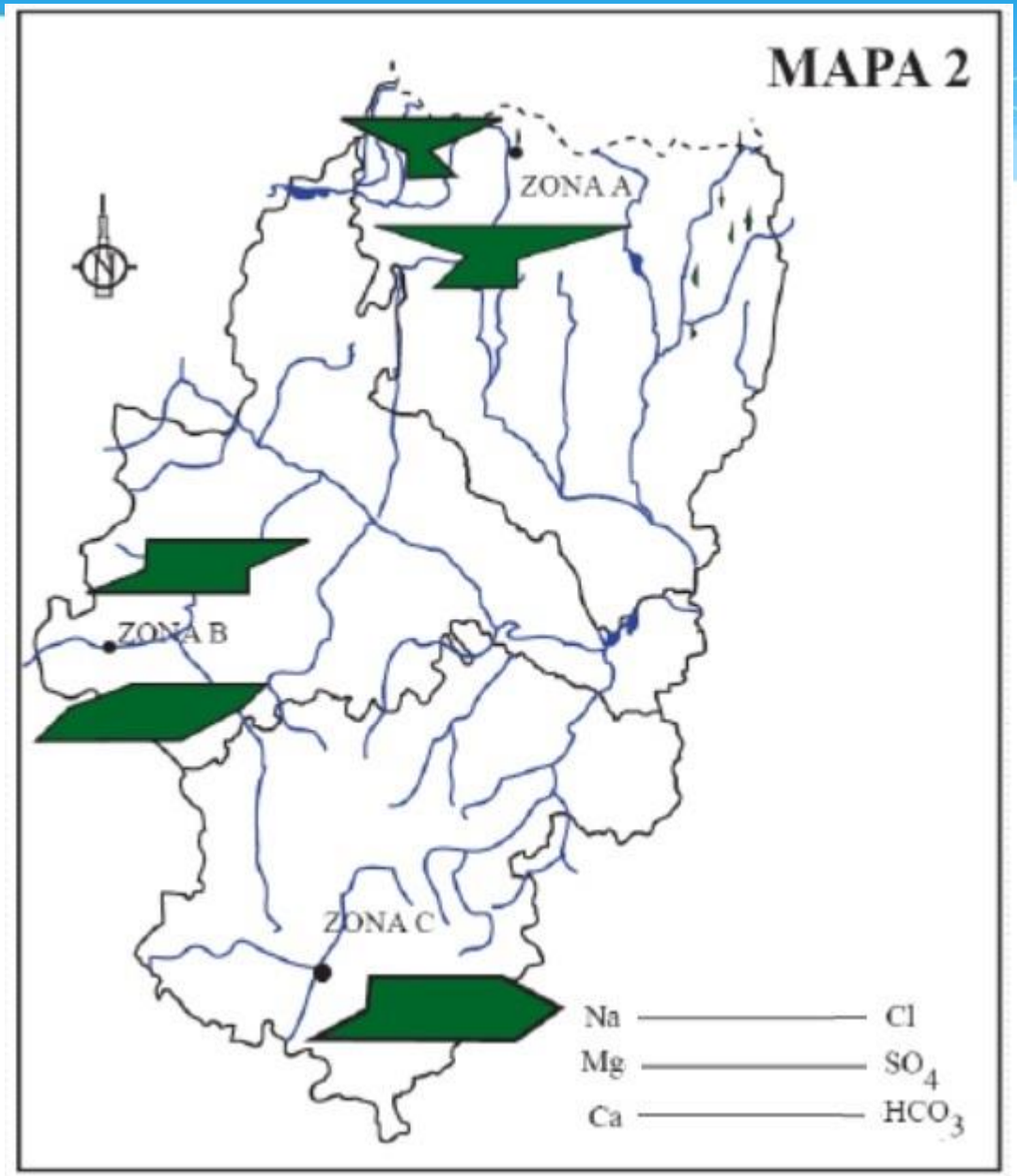
Fig. 5a. Map of Isoconductivity curves.
Fig. 5b. Map of Ca^{++}/Na^{+} relations.
Fig. 5c. Map of Na^{+} concentration.
Fig. 5d. Map of Cl concentration.

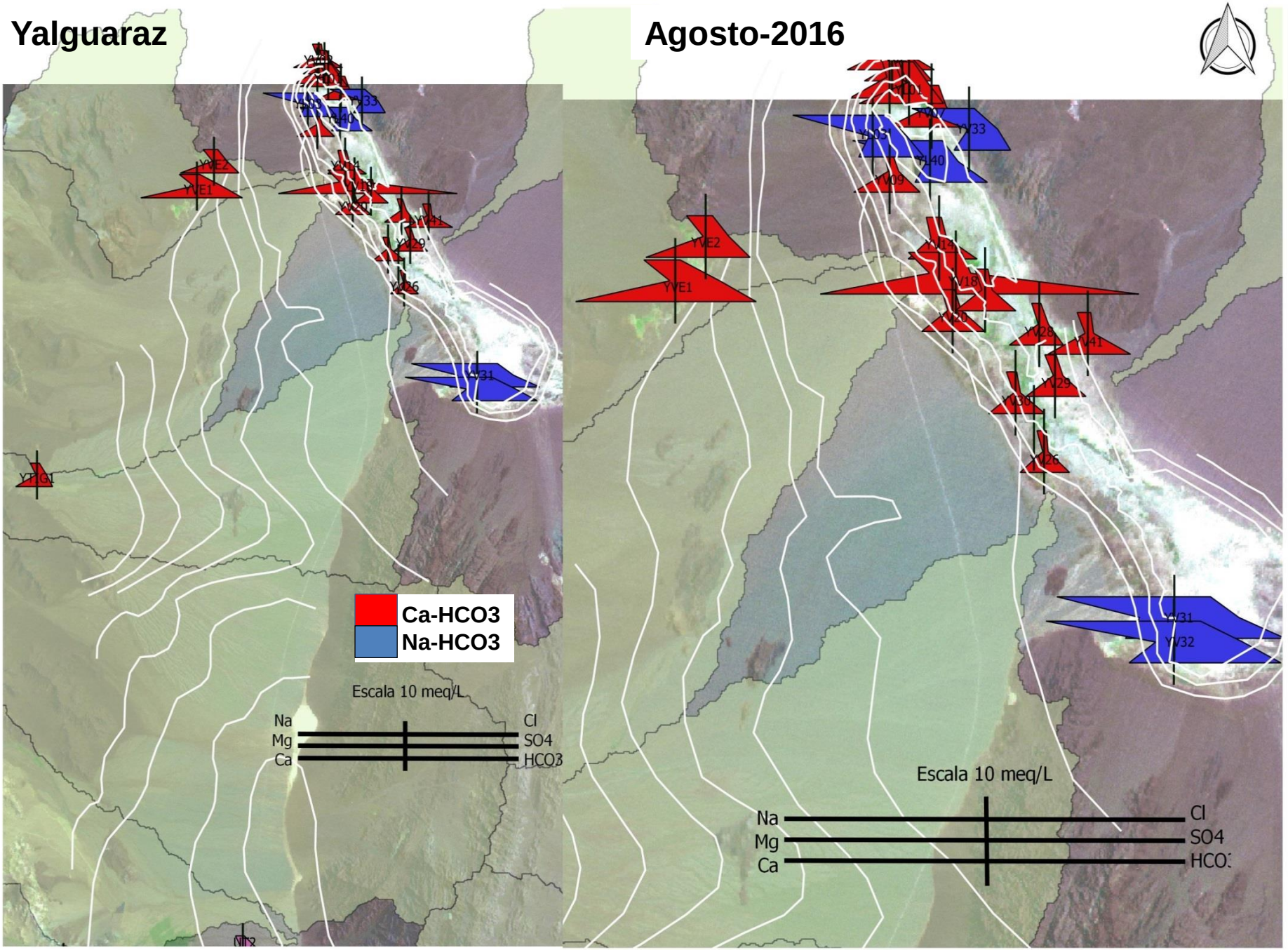
Mapas de la composición del agua

Permiten identificar rápidamente los sectores con la misma calidad, o si hay distintas recargas sobre el acuífero, o toda anomalía que se pueda presentar.



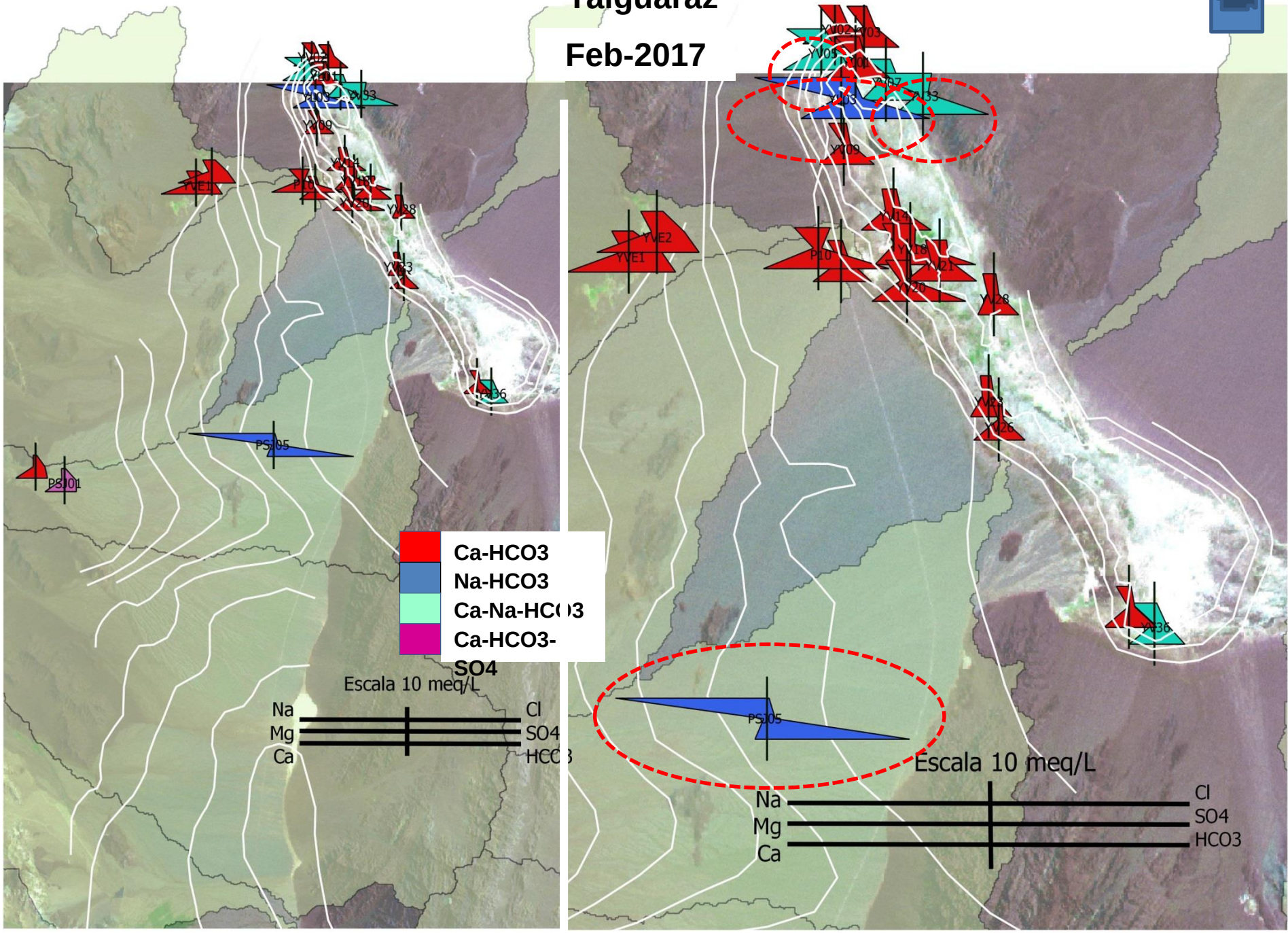

329000
330000
331000
332000
333000
334000
6169000
6168000
6167000
6166000
N
P-31
P-40
P-1
P-5
P-38
P-19
P-28
P-8
P-6
P-41
MONROE
J. I. GORRITI
Gral. SAVIO
Gral. HORNOS
TABARE
RICARDO GUIRALDES
COSTA RICA
OBLIGADO
GANDHI
FLORENCIO SANCHEZ
G.A. BECQUER
MOCTEZUMA
J. WATT
DIAGONAL NORTE
JUANA AZURDUY
ALMAFUERTE
COLECTORA
ACCESO OESTE
VICTORINO DE LA PLAZA
LA MADRE
LA RIOJA
LUIS DE CANDENS
DON BOSCO
ATAHUALPA
ROJAS
NAZCA
LA PROVIDENCIA
TIRSO DE MOLINA
TAMBOR DE TACUARI
Av. N. ALVAREZ
JUAN RACINE
RECUERDOS DE PROVINCIA
LA YERRA
AV. PABLO GAONA
ESTADOS UNIDOS
BELISARIO ROLDAN
WILDE
AYMARAES
AMADO NERVO
SAN PEDRO
PROVIDENCIA
LA TRADICION
J. LARRARDEN
BUSTAMANTE
DIARIO LA PRENSA
LOS FRESNOS
LOS ABEDULES
ESTACION FRANCISCO ALVAREZ
FEDERICO GARCIA LORCA
CRISOLOGO LARRALDE
EL ARREO
J. MIRO
CAYENA
SEMANA DE MAYO
VIDT
Cnel. FALCON
Na+
Mg++
Ca++
Cl-
SO4=
HCO3-
10
5
0
5
10
meq/l (milequivalente por litro)
0
500 m
P-41 punto de verificacion
MORENO - BUENOS AIRES - ARGENTINA
MONITOREO DE ACUÍFERO
(Serie Abril 2011)
DIAGRAMAS DE STEFF
ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS
Fecha: 07/2011
Interpretó:
Revisó:
FIGURA
9
sin valor catastral


MAPA 2
ZONA A
ZONA B
ZONA C
N
Na
Mg
Ca
Cl
SO_4
HCO_3


Yalguaraz
Agosto-2016
Ca-HCO3
Na-HCO3
Escala 10 meq/L
Na
Mg
Ca
Cl
SO4
HCO3
Escala 10 meq/L
Na
Mg
Ca
Cl
SO4
HCO3

Yalguaraz

Feb-2017



Contaminación del agua subterránea

El término contaminación se puede definir de modo tan amplio que **resulta difícil definir un concepto general**.

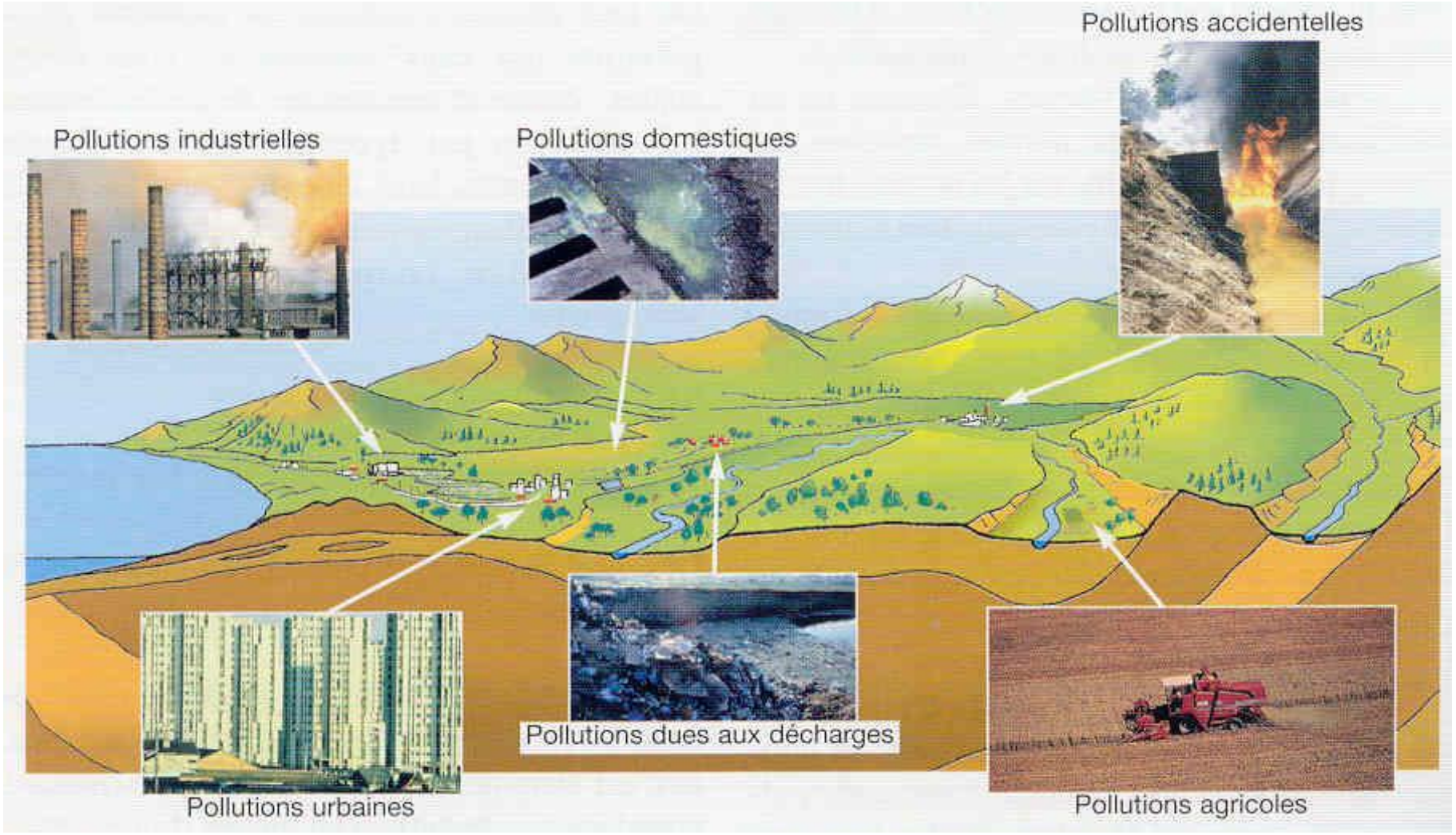
Algunas conceptualizaciones definen contaminación como:

Custodio y Llamas, 1983: la **modificación de la composición del agua**, por la **actividad** directa o indirecta del **hombre**, en una medida tal que su aptitud se ve restringida para todos o algunos de los usos para los podía servir en su estado natural.

Auge, 2004: la **alteración de las propiedades** físicas, químicas y/o biológicas del agua, por la acción de **procesos naturales o artificiales** que producen resultados indeseables.

Escuder et al., 2009: la **presencia o concentración anormal** de un **factor físico, químico o biológico** que ocasiona una alteración del rango normal de la calidad natural de las aguas.

Contaminación del agua subterránea



Agua subterránea

¿Problema? → **NO SE VE**

Baja percepción como recurso natural

Agua superficial:

- Es visible; acción contaminante puede ser corregida

Agua subterránea:

- Al no ser visible la acción protectora y correctiva llega con frecuencia tarde
- Cuando se hace perceptible seguramente ha alcanzado un importante desarrollo en extensión

Contaminación del agua subterránea

Las aguas subterráneas se originan principalmente por exceso de precipitación que se infiltra directa o indirectamente en la superficie del terreno.

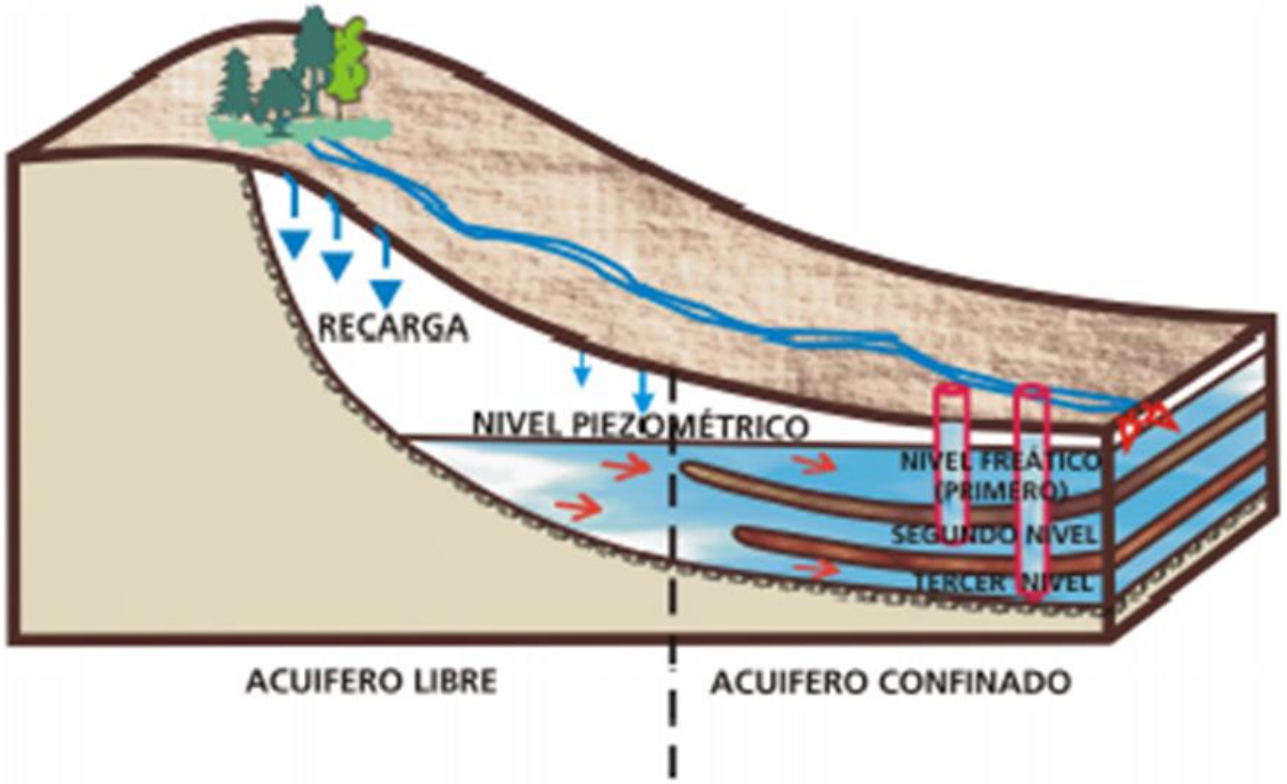
Como consecuencia, las **actividades humanas en la superficie** pueden constituir una **amenaza a la calidad** del agua subterránea.

La **contaminación** de los **acuíferos** ocurre cuando la **carga de contaminantes** sobre el subsuelo generados por descargas o lixiviados de actividades urbanas, industriales, agrícolas o mineras no es controlada adecuadamente, y en ciertos componentes **excede la capacidad natural de atenuación del subsuelo** y capas subyacentes.

Una vez **producida** la **contaminación** de un **acuífero**, si es que puede ser revertida, su **regeneración** suele ser **extraordinariamente lenta** (varias décadas), con **mínimas posibilidades** de **llegar** nuevamente a sus condiciones de **calidad original**.

Contaminación del agua subterránea

Sin actividad antrópica

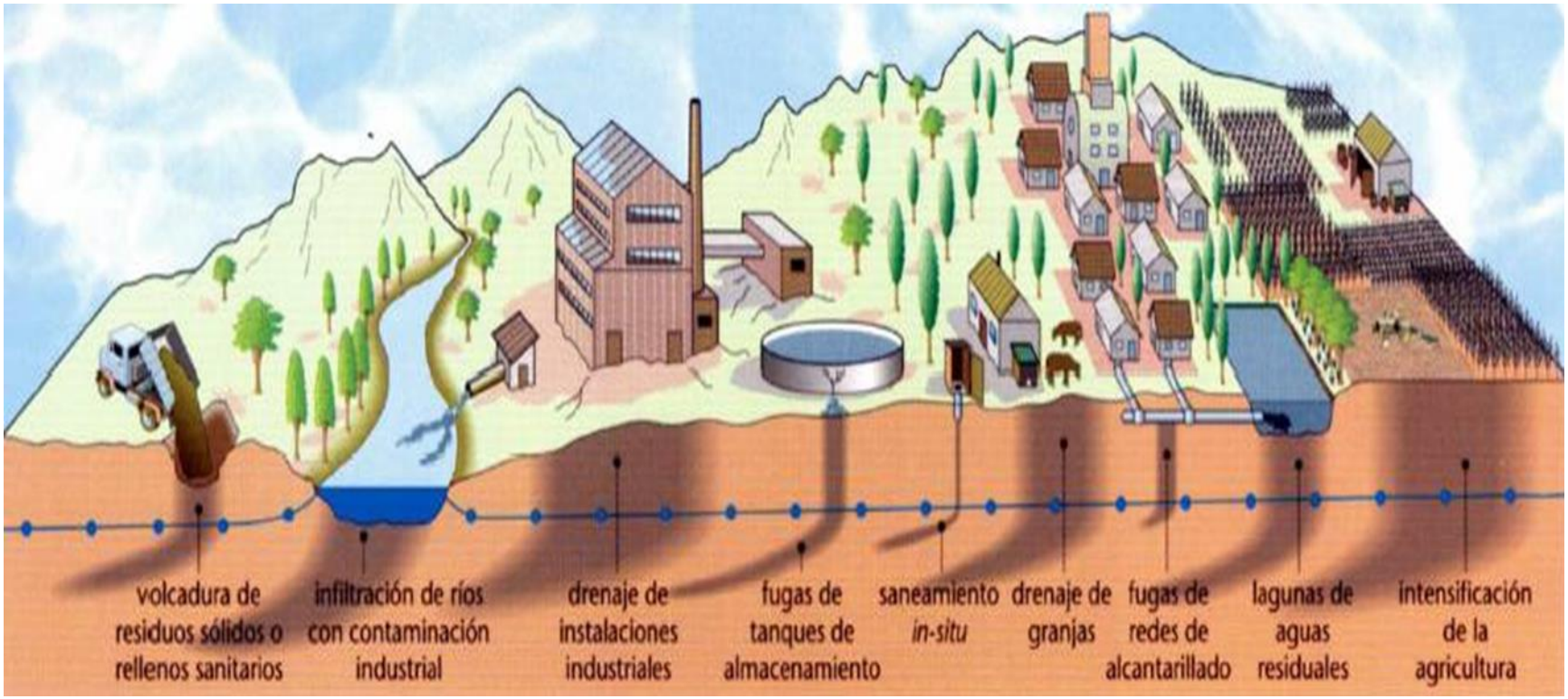


Contaminación del agua subterránea

Con actividad antrópica



Procesos comunes de contaminación del agua subterránea



Causas de Afectación

Acuífero LIBRE

- Agricultura
- Asentamientos poblacionales
- Actividad Industrial

Acuífero CONFINADO

- Corrosión de cañerías
- Mala cementación
- Sobreexplotación

Tipos de contaminantes

Minerales-Inorgánicos (solubles: Cl, SO4, Na, Ca…)

Orgánicos degradables (excretas)

Orgánico poco o no degradables (HC, pesticidas, detergentes…)

Biológicos (bacterias, algas, virus..)

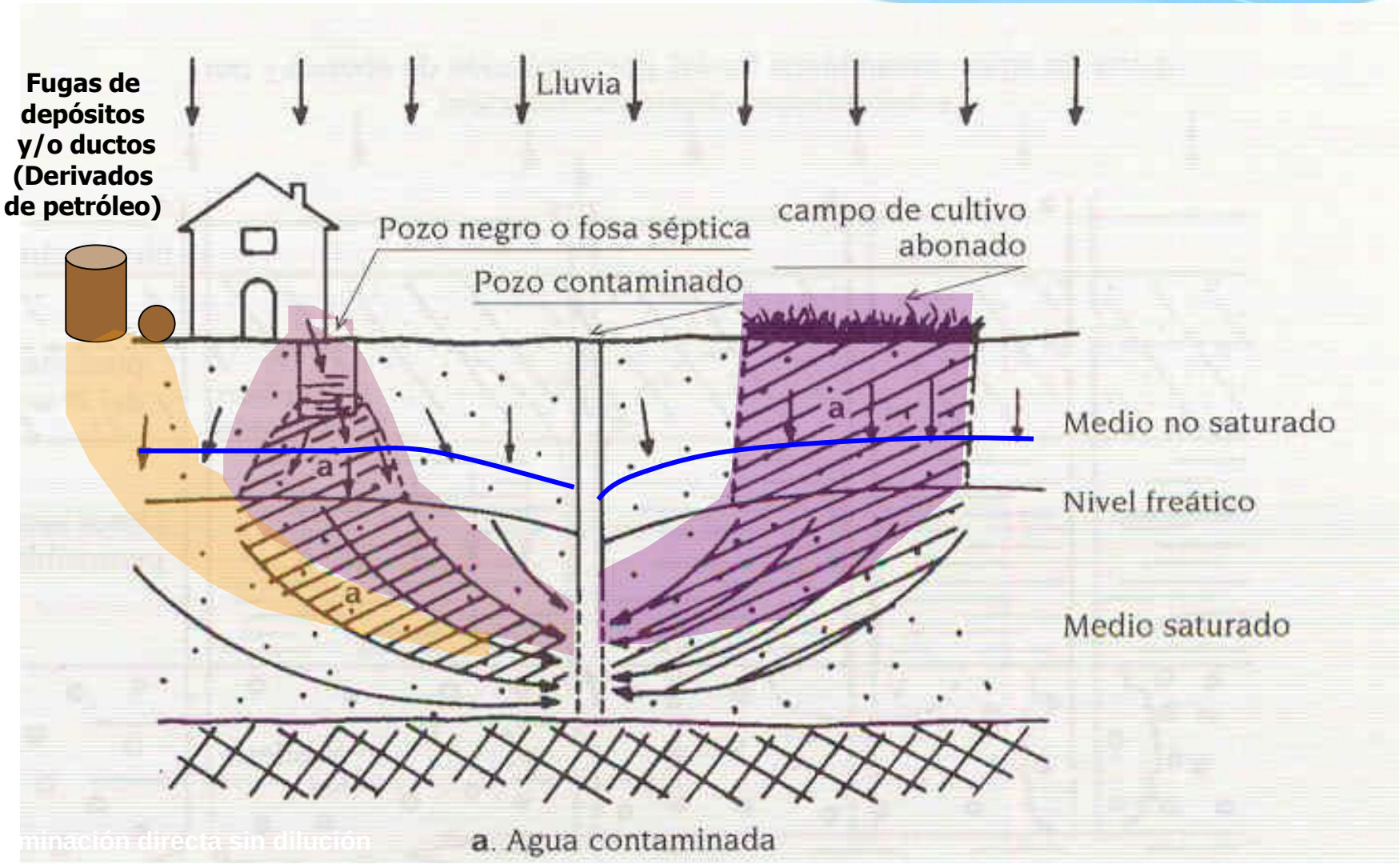
Radioactivos

Clasificación de los problemas de calidad del agua subterránea

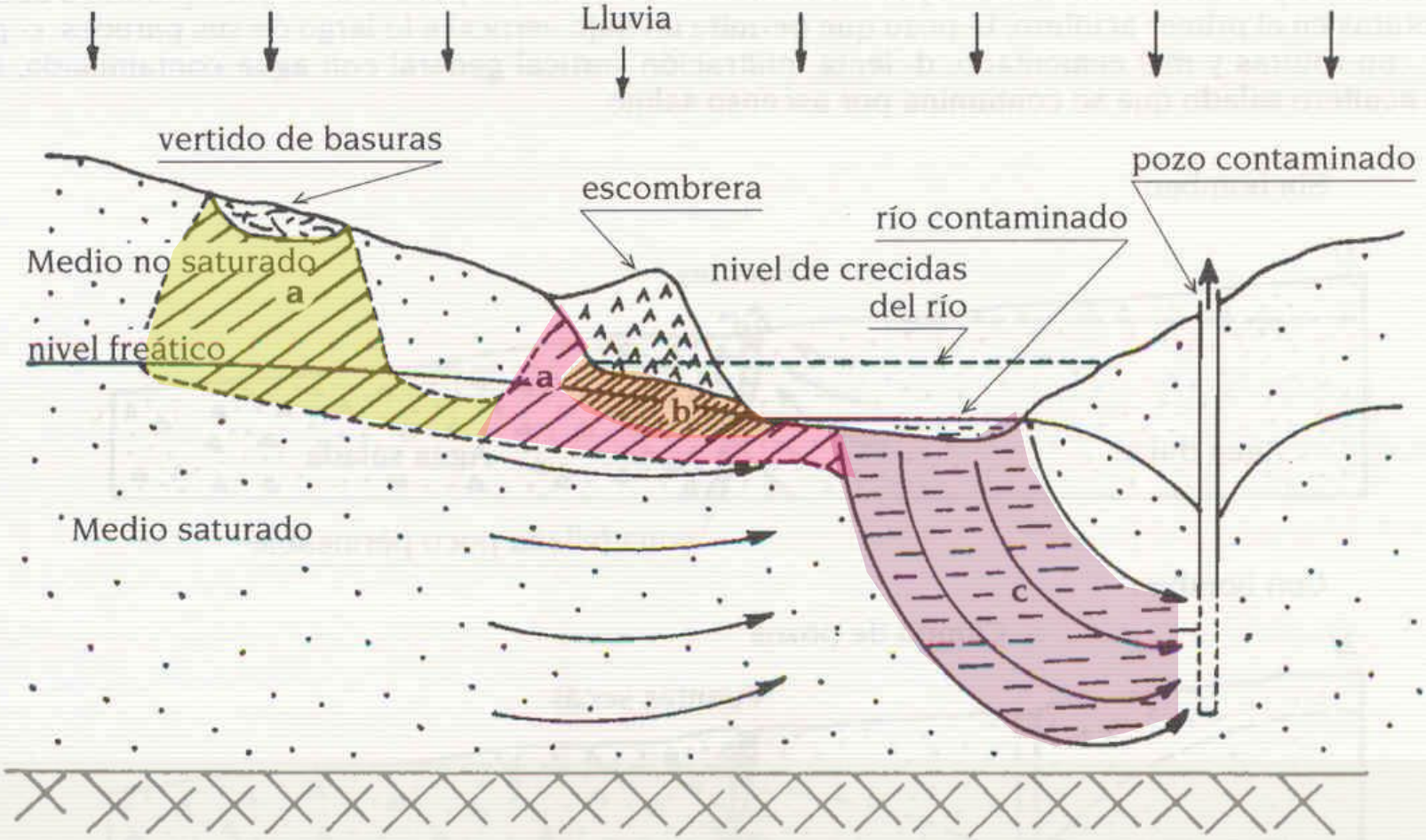
TIPO DE PROBLEMA	CAUSA SUBYACENTE	CONTAMINANTES DE INTERÉS
CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO	protección inadecuada de acuíferos vulnerables contra descargas y lixiviados proveniente de actividades urbanas/industriales e intensificación de cultivos agrícolas	patógenos, nitrato o amonio, cloruro, sulfato, boro, arsénico, metales pesados, carbono orgánico disuelto, hidrocarburos aromáticos y halogenados, algunos pesticidas
CONTAMINACIÓN DE LA CABECERA DEL POZO	construcción/diseño inadecuado del pozo que permite el ingreso directo de agua superficial o agua subterránea poco profunda contaminada	principalmente patógenos
Intrusión Salina	agua subterránea salada (y a veces contaminada) inducida a fluir hacia acuíferos de agua dulce como resultado de una extracción excesiva	principalmente cloruro de sodio, pero puede incluir además contaminantes persistentes provenientes de la acción del hombre
Contaminación que Ocurre Naturalmente	relacionado con la evolución química del agua subterránea y la solución de minerales (puede estar agravado por la contaminación antrópica y/o la extracción excesiva)	principalmente hierro y flúor solubles, a veces sulfato de magnesio, arsénico, manganeso, selenio y otras especies inorgánicas

MODOS DE CONTAMINACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

Esquema de contaminación de un pozo en acuífero libre

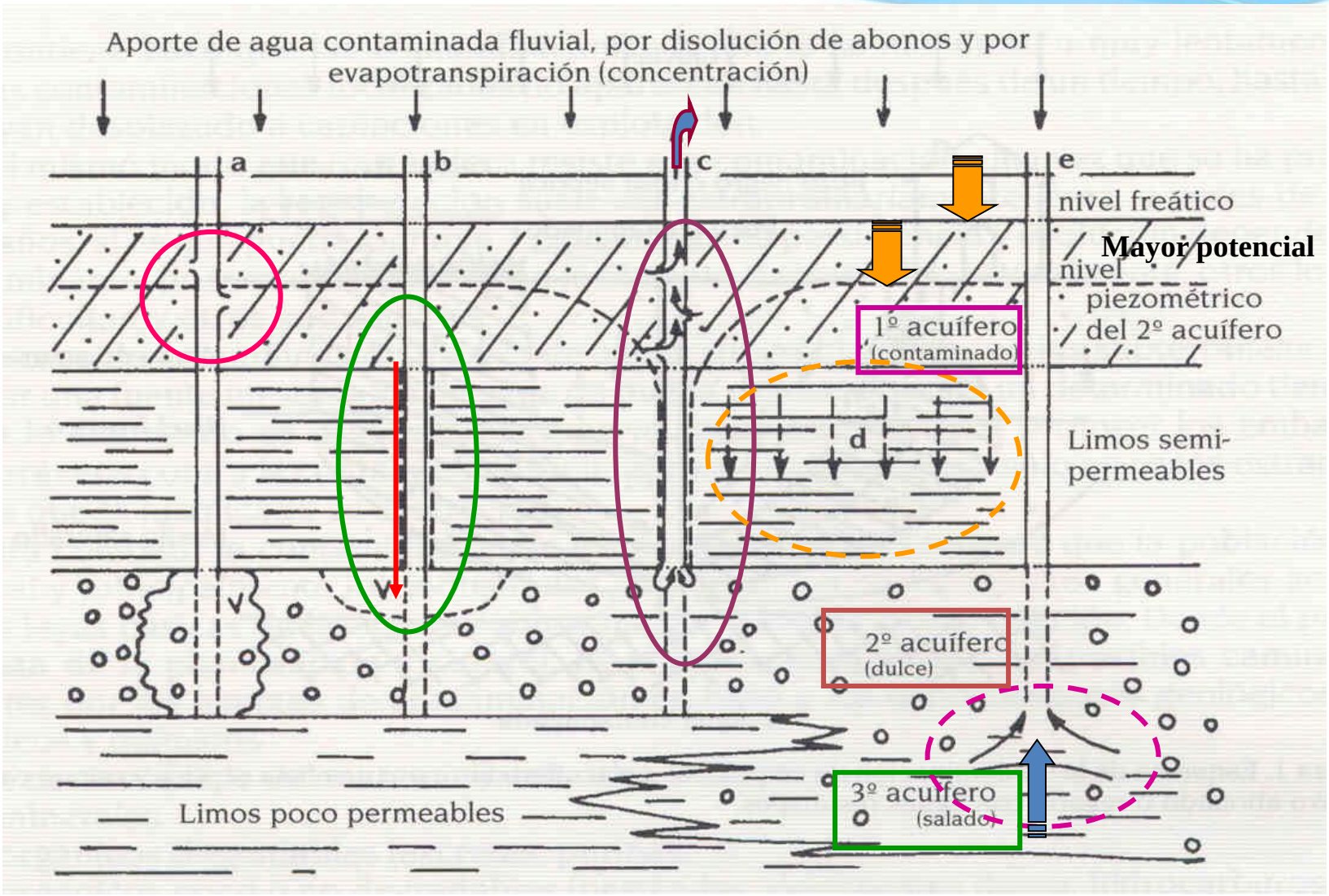


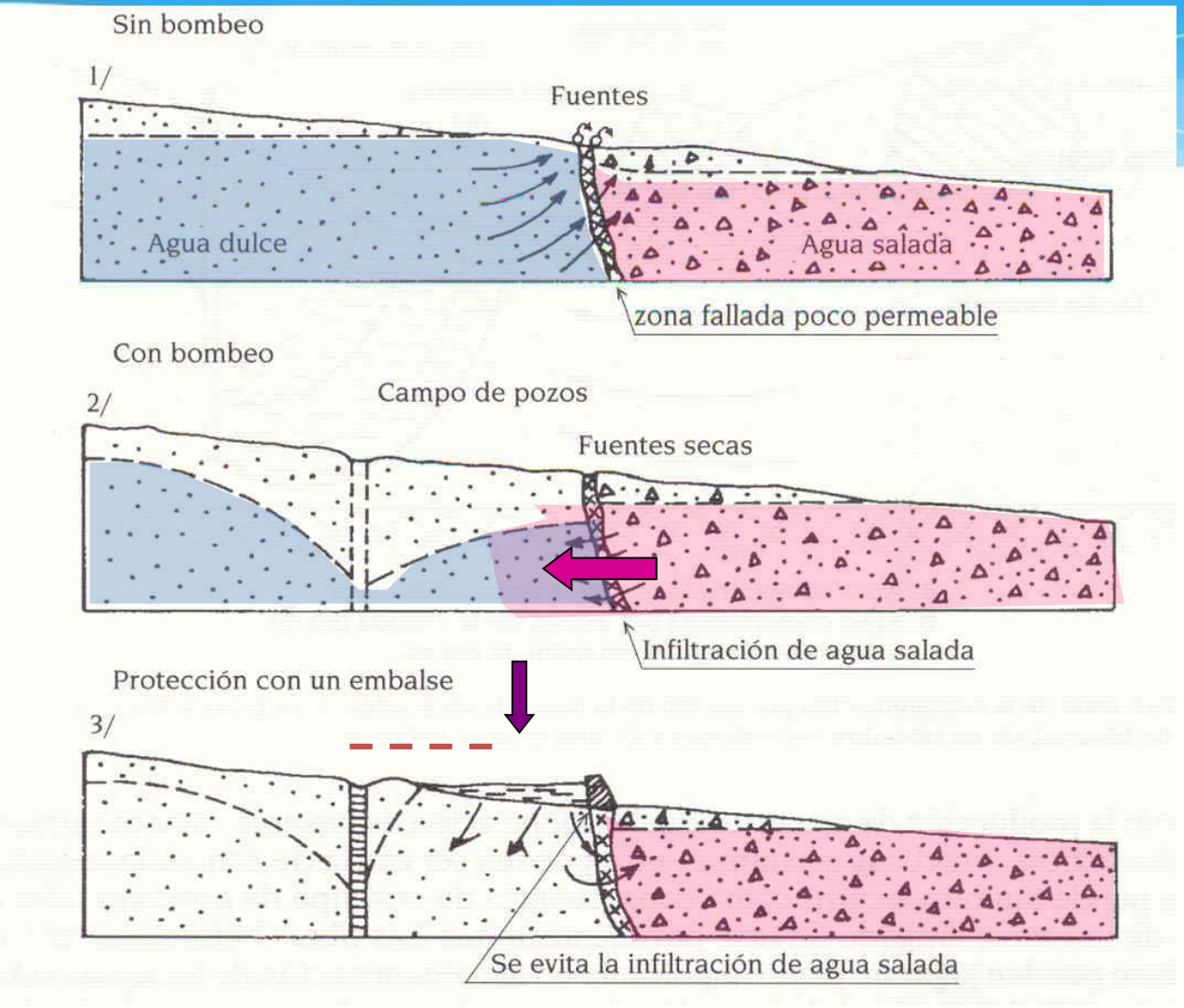
Esquema de contaminación de un pozo



a. Agua contaminada por infiltración de la lluvia
b. Agua contaminada por acción de la crecida del río
c. infiltración de agua contaminada del río

Esquema de contaminación de un pozo en acuífero libre





Contaminación de un acuífero de agua dulce por infiltración de un acuífero de agua salada lateral a causa del establecimiento de intensos bombeos; modo de restauración. (Según Compte y Custodio, 1969.)

Estudio de vulnerabilidad

Posibilidad que tiene el sistema de ser afectado por algún proceso de contaminación

Existen varios métodos.

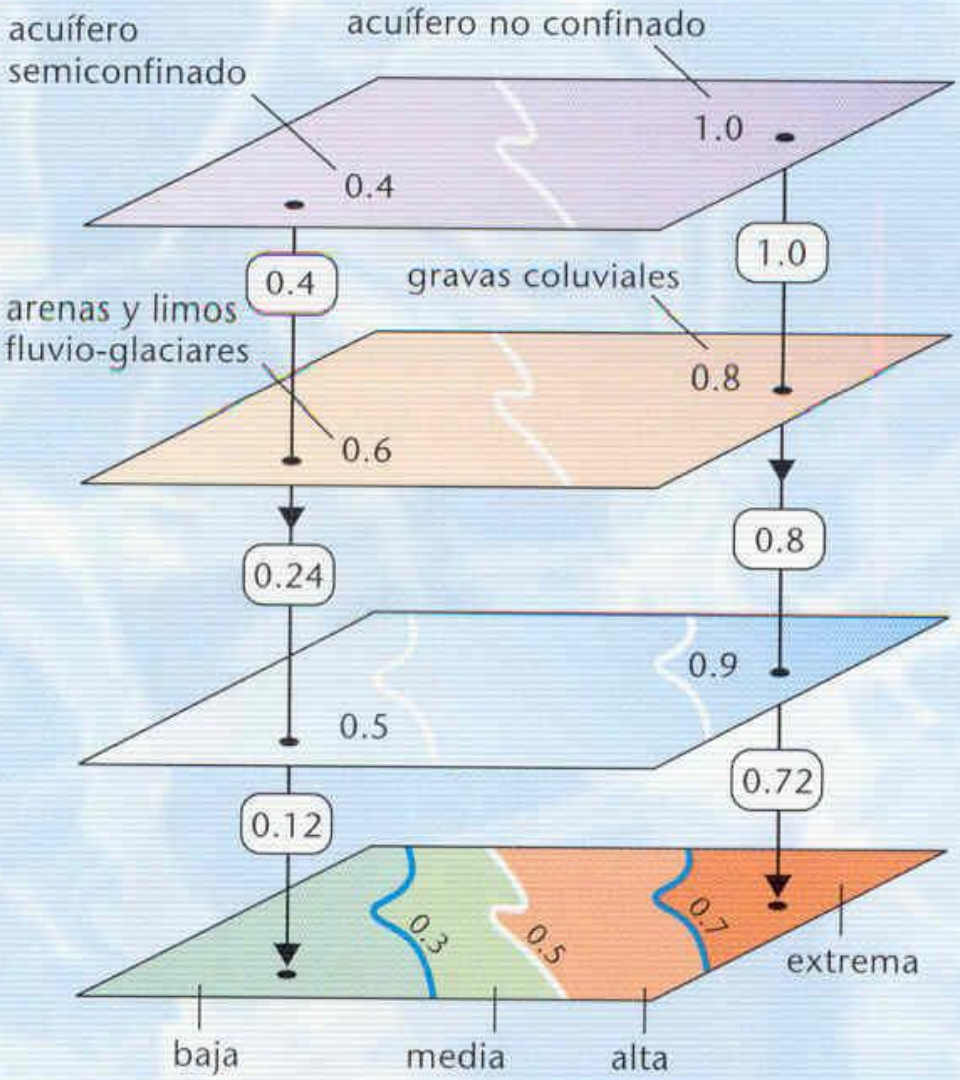
GOD. Este método propuesto por FOSTER (1987), se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a 3 variables que son las que nominan el acrónimo:

- **G** (**g**round water occurrence – tipo de acuífero)
- **O** (**o**verall aquifer class – litología de la cobertura)
- **D** (**d**epth – profundidad del agua o del acuífero).

Los valores se extraen de un diagrama. Los 3 índices que se multiplican entre sí, resultan en uno final (diagrama de salida - output) que puede variar entre

1 (vulnerabilidad máxima) y 0 (vulnerabilidad mínima)

Generación del mapa de vulnerabilidad a la contaminación utilizando el método GOD



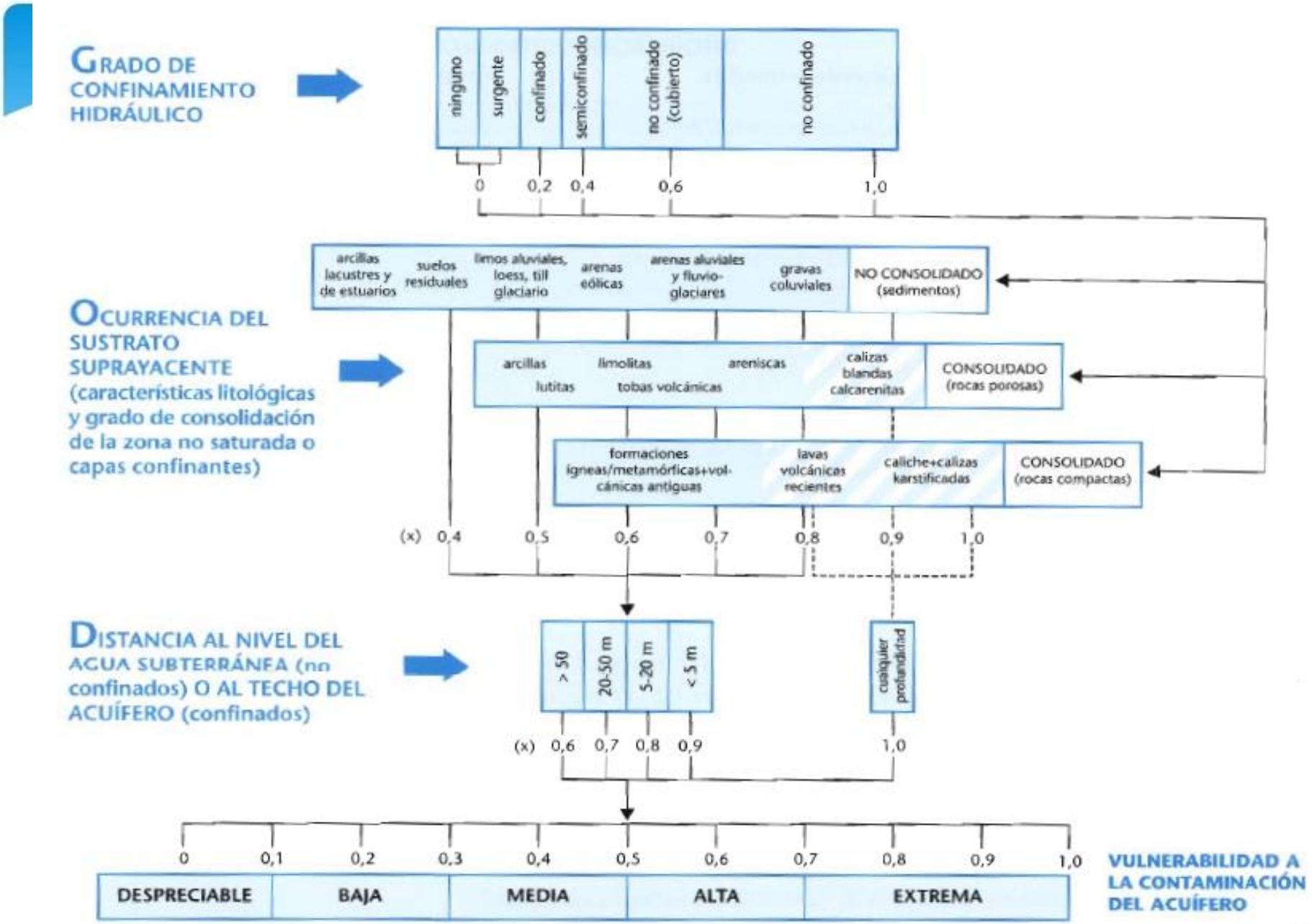
GRADO DE CONFINAMIENTO

OCURRENCIA DEL ESTRATO SUPRAYACENTE

(características litológicas y grado de consolidación)

DISTANCIA AL NIVEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA (no confinados) O AL TECHO DEL ACUÍFERO (confinados)

VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO


GRADO DE CONFINAMIENTO HIDRÁULICO
ninguno
surgente
confinado
semiconfinado
no confinado (cubierto)
no confinado
0
0,2
0,4
0,6
1,0
OCURRENCIA DEL SUSTRATO SUPRAYACENTE (características litológicas y grado de consolidación de la zona no saturada o capas confinantes)
arcillas lacustres y de estuarios
suelos residuales
limos aluviales, loess, till glaciario
arenas eólicas
arenas aluviales y fluvio-glaciares
gravas coluviales
NO CONSOLIDADO (sedimentos)
arcillas
lutitas
limolitas
tobas volcánicas
areniscas
calizas blandas calcarenitas
CONSOLIDADO (rocas porosas)
formaciones ígneas/metamórficas+volcánicas antiguas
lavas volcánicas recientes
caliche+calizas karstificadas
CONSOLIDADO (rocas compactas)
(x) 0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
DISTANCIA AL NIVEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA (no confinados) O AL TECHO DEL ACUÍFERO (confinados)
> 50
20-50 m
5-20 m
< 5 m
cualquier profundidad
(x) 0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
DESPRECIABLE
BAJA
MEDIA
ALTA
EXTREMA
VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO

Definición de las clases de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos

CLASE DE VULNERABILIDAD	DEFINICIÓN CORRESPONDIENTE
Extrema	vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación
Alta	vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación
Moderada	vulnerable a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados
Baja	sólo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos períodos de tiempo
Despreciable	presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos

