Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra
Guatemalan Journal of Earth Sciences
Vol. 13, Núm. 1, 2026 | ISSN impreso 2410-728X | ISSN electrónico 3106-0056
https://www.geologiausac.com

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Modelos predictivos y gestión hidrogeológica para la intrusión de agua salada en acuíferos costeros de Guatemala

Predictive models and hydrogeological management of saltwater intrusion in coastal aquifers of Guatemala

Rudy Machorro Sagastume

Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales (ASGA), Ciudad de Guatemala, Guatemala.
Autor de correspondencia: rudy.machorro@yahoo.com
ORCID: Rudy Machorro Sagastume https://orcid.org/0009-0001-5822-1020

Recibido: 07/08/2026 | **Aceptado:** 17/09/2026 | **Publicado:** 27/11/2026

Resumen

Se revisaron los procesos hidrogeológicos que ocurren en los acuíferos costeros y las metodologías predictivas para evaluar la amenaza de intrusión de agua salada (IAS), con el fin de aportar pautas para la gestión y el desarrollo de las aguas subterráneas en las zonas costeras de Guatemala. Los modelos predictivos analizados son la ecuación de Ghyben-Herzberg, la corrección de Hubbert, la ecuación de Glover y la solución analítica de Verruijt, esta última aplicada a un ejemplo con dos escenarios de recarga. Se evalúa el bombeo en acuíferos costeros y el caudal crítico de los pozos para prevenir la intrusión cónica de agua salada (*upconing*). Se describe la dinámica del flujo subterráneo asociada a las variaciones del nivel del mar, en particular a las mareas terrestres y atmosféricas. El riesgo de IAS en pozos costeros depende sobre todo de la distancia del pozo a la línea de costa y de la profundidad de perforación respecto del nivel del mar. Como pautas mínimas de gestión se proponen: a) incluir en los estudios hidrogeológicos la salinidad de los pozos existentes; b) evitar perforar dentro de los primeros 50 m de la línea de costa; c) usar modelos predictivos y métodos geoeléctricos para estimar la profundidad de la interfase; d) monitorear los sólidos disueltos totales, la conductividad eléctrica y la salinidad durante la perforación, y e) promover una norma para el desarrollo sostenible de las aguas subterráneas que impida la sobreexplotación y la IAS en los acuíferos costeros.

Palabras clave: acuíferos costeros; Guatemala; interfase cónica; intrusión salina; mareas

Abstract

This review examines the hydrogeological processes that occur in coastal aquifers and the predictive methodologies used to assess the threat of saltwater intrusion (SWI), in order to provide guidelines for groundwater management and development in the coastal zones of Guatemala. The predictive models analyzed are the Ghyben-Herzberg equation, the Hubbert correction, the Glover equation and Verruijt's analytical solution, the latter applied to an example with two recharge scenarios. Pumping in coastal aquifers and the critical well discharge needed

to prevent saltwater upconing are evaluated. Groundwater flow dynamics associated with sea-level variations, particularly Earth and atmospheric tides, are described. The risk of SWI in coastal wells depends mainly on the distance of the well from the coastline and on the drilling depth relative to sea level. The following minimum management guidelines are proposed: a) include the salinity of existing wells in hydrogeological studies; b) avoid drilling within the first 50 m of the coastline; c) use predictive models and geoelectrical methods to estimate the depth of the interface; d) monitor total dissolved solids, electrical conductivity and salinity during drilling; and e) promote a standard for the sustainable development of groundwater that prevents overexploitation and SWI in coastal aquifers.

Keywords: coastal aquifers; conical interface; Guatemala; saline intrusion; tides

Cómo citar este artículo (APA 7.ª ed.)

Machorro Sagastume, R. (2026). Modelos predictivos y gestión hidrogeológica para la intrusión de agua salada en acuíferos costeros de Guatemala. *Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra, 13*(1), 83–96.

1. Introducción

El uso de las aguas subterráneas se ha incrementado en las zonas costeras debido al crecimiento de la población. El objetivo de este artículo es aportar información básica acerca de los acuíferos costeros y su gestión ambiental. Cada zona costera tiene características hidrogeológicas y socioeconómicas distintas por lo que los escenarios costeros presentados en este artículo no son exhaustivos, pero incluyen conceptos de gestión comunes a todos los acuíferos costeros. La Figura 1 muestra la amplia variedad de procesos que actúan sobre los acuíferos costeros. Algunos procesos como el cambio climático y la actividad tectónica se manifiestan a largo plazo, pero otros como los tsunamis y los huracanes pueden impactar severamente el acuífero en el corto plazo.

Figura 1

Factores que influyen en los acuíferos costeros y sus efectos

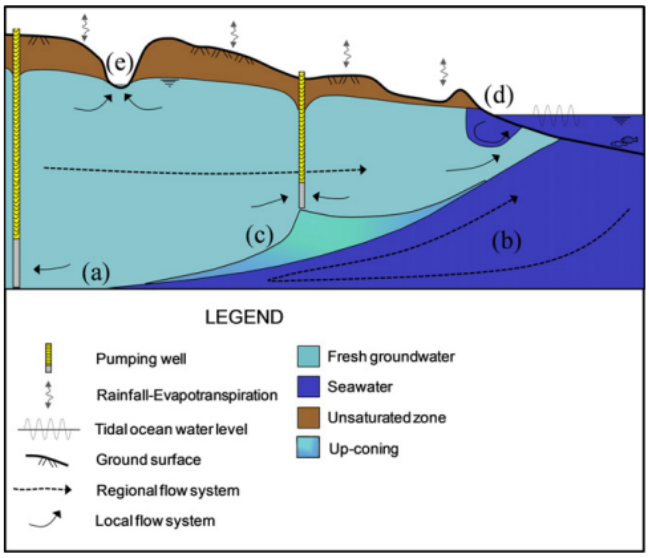


Nota. Modificado de Post et al. (2018).

Dentro de los diferentes procesos que ocurren en un acuífero costero, en este artículo se aborda la intrusión de agua salada (IAS) que se define como el desplazamiento de agua dulce por agua salada en un acuífero costero. La causa de la IAS puede ser natural debido a una disminución de la recarga de aguas subterráneas o a un aumento en el nivel local del mar, pero en la mayoría de casos el principal proceso impulsor es la sobreexplotación del acuífero. La IAS reduce el almacenamiento de agua dulce y en casos extremos ocasiona el abandono de pozos de agua domésticos cuando la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) excede los estándares de calidad de agua para consumo humano. En términos simples, el agua dulce se define como el agua que tiene SDT menores a 1 000 mg/l y concentraciones de cloruro menores a 250 mg/l. Para el agua marina estos valores son 35 000 y 19 000 mg/l, respectivamente. Los valores de SDT entre estas concentraciones corresponden a *la interfase agua dulce/agua salada* (también conocida como zona de mezcla o zona de transición), es decir, la superficie de contacto entre el agua dulce y el agua salada, la cual es una característica importante de los acuíferos costeros. La concentración de sales y densidad del fluido varía a lo largo de la interfase debido a la dispersión mecánica y la difusión molecular creando una circulación convectiva dentro de la cuña de agua salada.

La Figura 2 representa de manera simplificada el contexto de un acuífero costero no confinado con varios de los procesos hidrogeológicos que son objeto del presente artículo. La IAS puede ocurrir a lo largo de varios kilómetros hacia el interior del continente lo cual depende principalmente de la geometría del acuífero y el gradiente hidráulico, aunque también influye la mineralización de las aguas continentales la cual aumenta con la profundidad. La interfase puede variar de unos metros a varios kilómetros por lo que la gestión de un acuífero costero requiere que se determine con precisión la posición y espesor de la interfase.

Figura 2
Diagrama simplificado de un acuífero costero no confinado



Nota. (a) Punta de la cuña de agua marina; (b) circulación impulsada por la diferencia de densidades en la zona con agua marina; (c) intrusión cónica de agua salada; (d) procesos en la franja costera, como el frente de filtración de marea y la zona superior de recirculación de agua marina; (e) expresión superficial de agua subterránea sujeta a presión. Tomado de Werner et al. (2013).

2. Metodologías predictivas para evaluar la ocurrencia de la IAS

La caracterización del movimiento de agua salada en un sistema de aguas subterráneas es una tarea sumamente compleja. Las propiedades del sistema de flujo en la interfase son muy difíciles de determinar adecuadamente, manifestándose frecuentemente un flujo de densidad variable, flujo advectivo de agua subterránea y movimiento difusivo de agua entre zonas de alta salinidad y agua dulce. Frecuentemente existe incertidumbre elevada en relación con las características hidráulicas de los estratos acuíferos que se presentan entre el agua salada y el agua dulce.

Las ecuaciones analíticas que abordan exclusivamente los cambios en presiones hidráulicas o gradiente hidráulico de agua subterránea no pueden utilizarse para predecir la posición de la interfase. Existen otras ecuaciones analíticas que permiten identificar el riesgo de la IAS y que se describen a continuación.

2.1 Ecuación de Ghyben-Herzberg

En condiciones naturales el agua subterránea dulce de menor densidad sobreyace al agua salada más densa (Figura 3) y el espesor del agua dulce se puede estimar con base en la relación de las densidades respectivas. Esta relación la derivaron de manera independiente Ghyben y Herzberg a finales del siglo XIX:

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h \qquad (1)$$

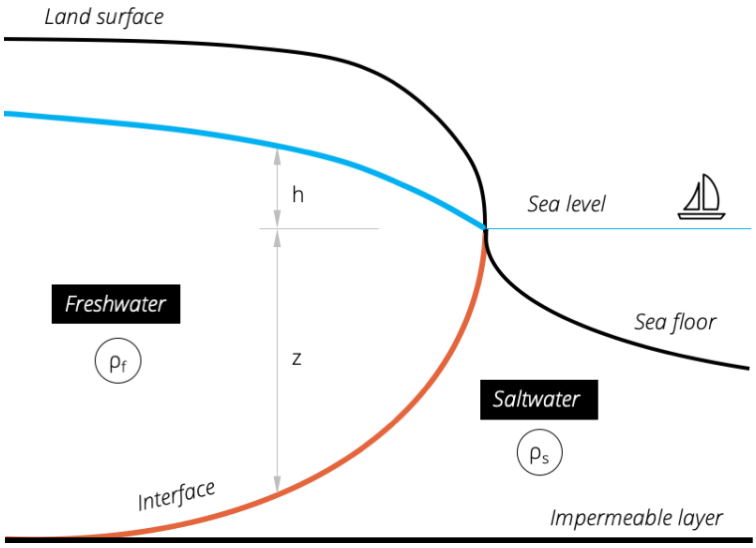
donde z es el espesor del agua dulce entre la interfase y el nivel del mar; ρ_f, la densidad del agua dulce (1.000 g/cm³ a 20 °C); ρ_s, la densidad del agua salada (1.025 g/cm³), y h, el espesor del agua dulce entre el nivel del mar y el nivel freático.

Aunque la diferencia de densidades es pequeña, la ecuación (2), obtenida a partir de la ecuación (1), indica que por cada metro de agua dulce por encima del nivel del mar hay 40 m de agua dulce por debajo de él:

$$z = 40h \qquad (2)$$

Figura 3

Posición de la cuña de agua salada considerando que la interfase es un plano y que no existe una zona de mezcla de agua dulce con agua salada



Nota. Traducido de INOWAS (2018).

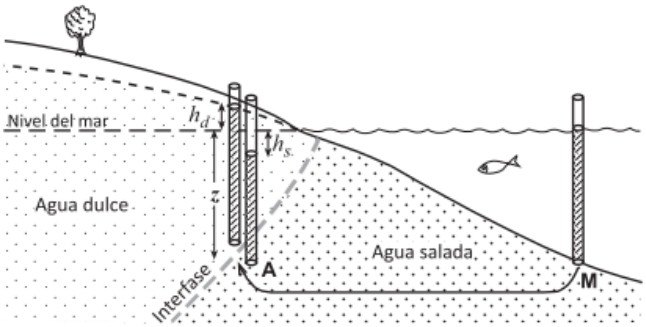
Aunque en varias situaciones la ecuación (2) tiene suficiente precisión, no describe la naturaleza real de la interfase agua dulce/agua salada ya que *asume un escenario hidrostático donde ninguno de los dos tipos de agua se mueve*. En la realidad, el agua subterránea dulce descarga en el cuerpo de agua salada con cierta velocidad y a través de una superficie de infiltración de cierto espesor, generando una interfase en la cual se mezclan dos aguas de diferente densidad por los procesos de dispersión y difusión molecular. El ambiente hidrodinámico en la zona costera ocasiona que el agua dulce y el agua salada se muevan ocasionalmente hacia el océano y otras veces hacia tierra firme. La ecuación (2) puede aplicarse en una primera aproximación a un pozo que se localiza cerca de la línea de costa que registra agua dulce y un nivel freático a 2 metros sobre el nivel del mar (h) para estimar la profundidad (*z*), respecto de la cota 0, a la que se encontraría el agua salada, dando por resultado 80 metros.

2.2 Corrección de Hubbert

La descarga de agua dulce en el agua salada ocasiona que las líneas de flujo en el acuífero se desvíen de la vertical por lo que el espesor vertical real del agua dulce es algo mayor que el estimado con la ecuación de Ghyben-Herzberg lo cual fue identificado inicialmente por Hubbert (1940). La Figura 4 muestra que en el punto A la altura de la columna de agua salada no es z, sino que es menor, ya que el agua ha perdido cierta energía para desplazarse desde M hasta A.

Figura 4

Escenario costero para la fórmula de Hubbert



Nota. Tomado de Sánchez San Román (2009).

El valor de z con la corrección de Hubbert viene dado por la ecuación (3):

$$z = h_d \cdot \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} - h_s \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \qquad (3)$$

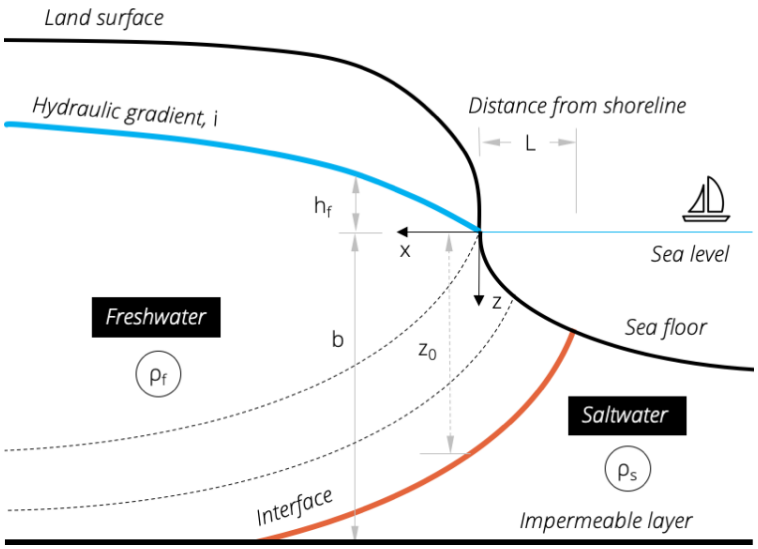
donde h_d es la altura de la columna de agua dulce por encima del nivel del mar y h_s, la altura de la columna de agua por debajo del nivel del mar.

2.3 Ecuación de Glover

Esta ecuación (4) toma en cuenta el gradiente de agua dulce para aproximar la interfase entre un área de agua dulce y un área de agua salada aportando una idea de la forma y extensión de la interfase. A diferencia de la ecuación de Ghyben-Herzberg, en este caso (Figura 5) el agua dulce descarga en el mar a lo largo de un área y no a lo largo de una línea.

Figura 5

Forma y extensión de la interfase agua dulce/agua salada en un acuífero costero, que puede calcularse con la ecuación de Glover



Nota. Traducido de INOWAS (2018).

$$z^2 = \frac{2qx\rho_f}{K(\rho_s - \rho_f)} + \left[\frac{q\rho_f}{K(\rho_s - \rho_f)}\right]^2 \qquad (4)$$

donde q es el caudal de descarga de agua dulce por unidad de longitud de línea de costa (L^2/T);

K, la conductividad hidráulica del acuífero (L/T); *x* y *z*, las coordenadas respecto de la línea de costa (L), y ρ_f y ρ_s, las densidades del agua dulce y del agua salada definidas en la ecuación (1).

A valores grandes de x, las ecuaciones de Glover (1959) y Ghyben-Herzberg tienden a dar los mismos resultados.

2.4 Solución analítica de Verruijt

El modelo analítico de Verruijt (1969) ha tenido amplia aceptación para abordar el problema de la IAS y se describe con las ecuaciones (5) a (7):

$$Z = -\sqrt{\left(\frac{q^2}{\beta^2 K^2}\right)\left(\frac{1-\beta}{1+\beta}\right) + \frac{2qx}{\beta K\,(1+\beta)}} \qquad (5)$$

$$H_f = \sqrt{\frac{2q\beta}{K\,(1+\beta)}}\,x \qquad (6)$$

$$x_o = \frac{q}{2\beta K} \qquad (7)$$

En la ecuación (5), Z es la profundidad de la interfase agua dulce/agua salada por debajo del nivel freático (m); en la ecuación (6), H_f es la presión equivalente de agua dulce (m); en la ecuación (7), x_o es la posición de la interfase agua dulce/agua salada en la superficie del terreno (se asignan valores positivos de la línea de costa hacia el mar y valores negativos de la línea de costa tierra adentro). Los términos de las ecuaciones del modelo de Verruijt se definen de la siguiente manera:

$$q = Ti \qquad (8)$$

donde q es la descarga específica de agua subterránea (m^2/d); T, la transmisividad del acuífero (m^2/d), e i, el gradiente hidráulico (adimensional).

$$\beta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \qquad (9)$$

donde β es un coeficiente adimensional que expresa el contraste de densidad entre el agua dulce (ρ_f = 1.0 g/cm^3) y el agua salada (ρ_s = 1.013 g/cm^3).

$$K = \frac{T}{b} \qquad (10)$$

donde K es la conductividad hidráulica (m/d) y b, el espesor del acuífero (m). Los valores altos de K inducen una interfase somera, mientras que los valores bajos de K producen una interfase profunda. Por último, x es la distancia (m) desde la línea de costa tierra adentro.

La Tabla 1 muestra un escenario hidrogeológico costero basado en Samper (2013) en el cual se ha aplicado la solución analítica de Verruijt para estimar la profundidad de la interfase agua dulce/agua salada en dos ámbitos hidrogeológicos muy diferentes de recarga de aguas subterráneas: a) 100 mm/año y b) 25 mm/año.

Tabla 1

Estimación de la IAS: posición de la cuña salada con el modelo de Verruijt (1969) para recargas de 100 y 25 mm/año

Recarga (mm/año)		
100		25
z	x	$z_{1/4}$
-10.59	0	-2.61
-23.07	-20	-10.66
-30.86	-40	-14.85
-37.04	-60	-18.09
-42.33	-80	-20.83
-47.03	-100	-23.26
-51.30	-120	-25.45
-55.25	-140	-27.47
-58.92	-160	-29.35
-62.39	-180	-31.11
-65.67	-200	-32.78
-68.79	-220	-34.37
-71.78	-240	-35.89
-74.65	-260	-37.35
-77.41	-280	-38.76
-80.08	-300	-40.11
-82.66	-320	-41.42
-85.16	-340	-42.69
-87.59	-360	-43.92
-89.96	-380	-45.12
-92.26	-400	-46.29
-94.51	-420	-47.43
-96.71	-440	-48.54
-98.85	-460	-49.63
-100.96	-480	-50.70
-103.02	-500	-51.74
-105.03	-520	-52.76
-107.01	-540	-53.76
-108.96	-560	-54.75
-110.87	-580	-55.71
-112.75	-600	-56.66
-114.60	-620	-57.60
-116.41	-640	-58.52
-118.20	-660	-59.42
-119.97	-680	-60.32
-121.71	-700	-61.20
-123.42	-720	-62.06
-125.11	-740	-62.92
-126.78	-760	-63.76
-128.42	-780	-64.59
-130.05	-800	-65.41
-131.65	-820	-66.22
-133.24	-840	-67.03
-134.80	-860	-67.82
-136.35	-880	-68.60
-137.88	-900	-69.37
-139.40	-920	-70.14
-140.90	-940	-70.90
-142.38	-960	-71.65
-143.85	-980	-72.39
-145.30	-1000	-73.12

ρ_s 1.025 β 0.025

ρ_f 1.000

Dibujar la forma de la cuña salada para las siguientes condiciones:

Longitud (L) de la línea de costa (km): 10

Recarga (r) anual de aguas subterráneas (mm): 100

Conductividad hidráulica del acuífero - K- (m/d): 10

Z = profundidad de la interfase agua dulce / agua salada por debajo del nivel freático (metros)

Para recarga de aguas subterráneas de 100 mm/año

Se estima el caudal (q) por unidad de longitud $q = r*L$

$q = 100 \frac{mm}{año} * \frac{1m}{10^3 mm} * \frac{1 año}{365 d} * \frac{10 km}{1 km} * \frac{10^3 m}{1 km} = 2.74 \frac{m^2}{d}$

Calcular el valor x_{cero}

En la ecuación de Verruijt, calcular el valor de x cuando z = o ("x_{cero}")

$$Z = -\sqrt{\left(\frac{q^2}{\beta^2 K^2}\right)\left(\frac{1-\beta}{1+\beta}\right) + \frac{2qx}{\beta K (1+\beta)}}$$

$X_{cero} = \frac{q*(1-\beta)}{2*K*\beta}$ **X_{cero} = 5.34 m**

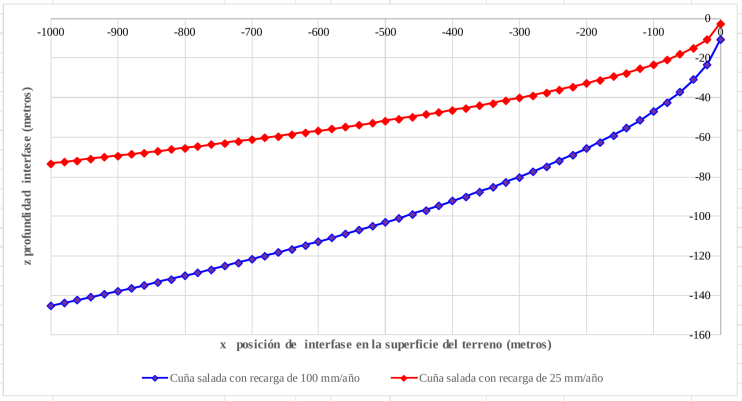
Con la siguiente ecuación asignar valores arbitrarios a x para estimar valores de z

z=- raiz(2*q*(xcero-x)/β*K*(1+β))

z= - raiz((21(5.34 - x))

Para recarga de aguas subterráneas de 25 mm/año

$X_{cero1/4} = \frac{q*(1-\beta)}{2*K*\beta}$ **$z_{1/4}$ = - raiz((5.34(1.28 - x))**



Nota. Escenario hidrogeológico basado en Samper (2013). *z* y $z_{1/4}$: profundidad de la interfase (m) para recargas de 100 y 25 mm/año, respectivamente; *x*: distancia desde la línea de costa (m).

3. Intrusión cónica de agua salada (*upconing*)

El bombeo en un acuífero costero puede causar el ascenso vertical del agua salada y una reducción de la zona con agua dulce por debajo de la bomba, proceso que se denomina *upconing*. *La migración vertical de agua salada inducida por el bombeo puede equivaler a 40 veces el descenso del nivel freático.* Bajo ciertas condiciones puede establecerse un equilibrio en el cual se desarrolla un cono estable a cierta profundidad de modo que las fuerzas ascendentes causadas por el bombeo se balancean con las fuerzas descendentes causadas por los efectos de densidad. El ritmo y extensión de la intrusión cónica de agua salada depende de varios factores, incluyendo las propiedades hidráulicas del sistema de acuíferos, ritmo y duración del bombeo, posición inicial de la

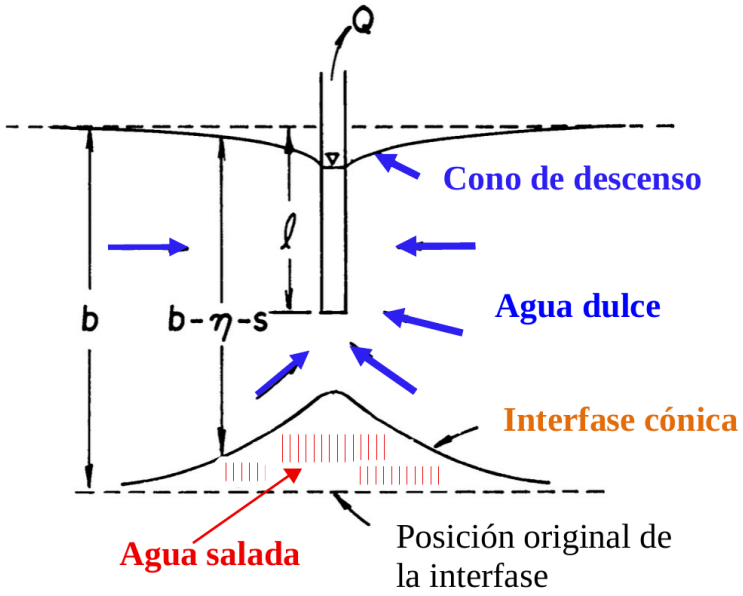
interfase, el contraste de densidad entre el agua dulce y el agua salada, y otros factores como dispersión y efectos de sorción, recarga de agua subterránea, ritmo de flujo regional, y la geometría del pozo y del acuífero.

3.1 Caudal crítico del pozo (Q_m)

El caudal máximo de bombeo en un acuífero costero con fines de impedir la IAS ha sido estimado por McWhorter y Sunada (1977). El descenso del nivel freático durante el bombeo ocasiona un ascenso de la interfase, la superficie de contacto entre el agua dulce y el agua salada (Figura 6). *Los abatimientos pequeños pueden ocasionar ascensos significativos de agua salada por lo que debe tenerse un control detallado de la variación de niveles de agua durante el bombeo con fines de prevenir la IAS.* En términos prácticos se considera que la interfase es estable para alturas intrusivas cónicas menores que o iguales a aproximadamente un tercio de la distancia entre el fondo del pozo y la elevación inicial de la interfase.

Figura 6

Intrusión cónica de la interfase agua dulce/agua salada debajo de un pozo de bombeo



Nota. Modificado de McWhorter y Sunada (1977).

El caudal máximo seguro (Q_m) que puede extraerse del pozo sin que ocurra IAS, asumiendo que la interfase no ascenderá más de un tercio de la distancia entre el fondo del pozo y la elevación inicial de la interfase, se obtiene con la ecuación (11):

$$Q_m = \frac{2\pi}{3}(b - l)^2 \frac{\Delta\rho}{\rho} K \qquad (11)$$

donde Q_m es el caudal crítico del pozo; b, la profundidad inicial de la interfase; l, la profundidad de la rejilla por debajo del nivel freático; K, la conductividad hidráulica del acuífero; ρ, la densidad del agua dulce, y $\Delta\rho$, la diferencia de densidad entre el agua salada y el agua dulce.

La aplicación de la ecuación (11) a un acuífero costero se ilustra con el siguiente ejemplo. Un acuífero con permeabilidad de 17 m/d tiene alojada una rejilla de 1 metro de longitud instalada a 16 m por debajo del nivel freático inicial. La interfase original agua dulce-agua salada se ubica a 32 m por debajo del nivel

freático. El caudal máximo seguro sin que ocurra intrusión de agua salada es el siguiente:

$$Q_m = \frac{2\pi}{3}(32-16)^2 \ \frac{0.025}{1}\ 17 \ = \ 228\ \mathrm{m^3/d} \ = \ 42\ \mathrm{gpm}$$

4. Influencia de las variaciones del nivel del mar en los acuíferos costeros

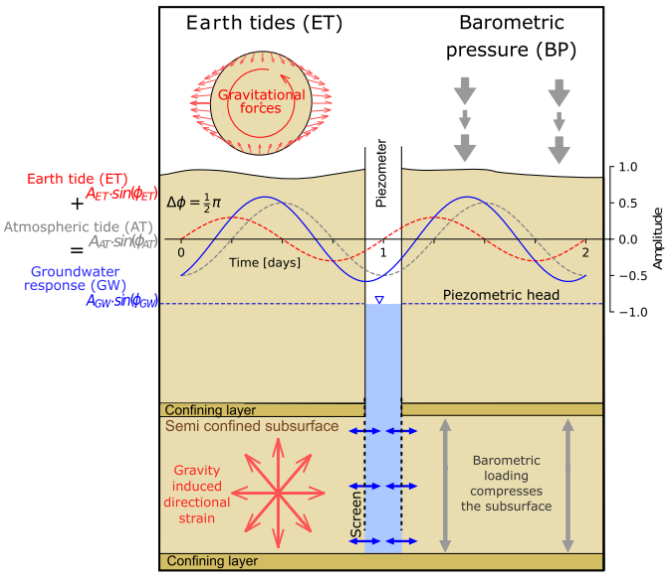
Las influencias de las fluctuaciones del nivel del mar en los sistemas de aguas subterráneas costeros son complejas y muy variadas. Existen tres tipos de variación del nivel del mar que resultan críticas para la hidrogeología de zonas costeras (Gilli et al., 2012): 1) las *oscilaciones vinculadas con las mareas*, que modifican el funcionamiento hidrodinámico del acuífero mediante cambios en el gradiente hidráulico y estimulan la mezcla de agua dulce con agua salada, lo cual impulsa reacciones geoquímicas; 2) las *oscilaciones históricas del nivel de los océanos asociadas a la órbita de la Tierra alrededor del Sol* (ciclos de Milankovitch), cuya fase fría causa una glaciación cada 90 000 años y disminuye el nivel global del mar, y 3) la *actividad tectónica*, que puede aislar porciones del mar en las que los aportes de lluvia y fluviales son menores que las pérdidas por evaporación, lo que causa un descenso del nivel, como ocurre en el Mar Muerto y el Golfo de México.

El cambio climático y el ascenso del nivel del mar deben tomarse en cuenta en el diseño de estrategias de gestión de los acuíferos costeros; en particular, el cambio climático global puede incrementar notablemente la IAS mediante transgresiones marinas y el aumento de la salinidad en cuerpos de agua superficiales.

Las mareas terrestres (MT) y la presión barométrica tienen impactos distintos en las aguas subterráneas (Figura 7). Las mareas terrestres (MT) derivadas del movimiento de cuerpos astronómicos en relación con la Tierra afectan la presión intersticial del agua en el acuífero lo que da por resultado cambios sutiles en la presión hidráulica y fluctuaciones en el nivel del agua subterránea. Estas señales se manifiestan como armónicos diarios (ondas sinusoidales) en los datos de monitoreo (lado izquierdo de la Figura 7). Por otro lado, la presión barométrica aplica esfuerzos verticales que también ocasionan fluctuaciones en el nivel del agua subterránea de los pozos (lado derecho de la Figura 7). Esta señal barométrica contiene fluctuaciones irregulares ocasionadas por los sistemas climatológicos incluyendo armónicas (ondas sinusoidales) derivadas de las mareas atmosféricas (MA). Existen metodologías para identificar y separar en frecuencia y tiempo las respuestas de los niveles de agua subterránea a las MA y MT, y para realizar un análisis detallado de series de tiempo de fluctuaciones de niveles del agua subterránea, lo cual está fuera del alcance del presente artículo.

Figura 7

Variación armónica de los niveles de agua subterránea en un pozo ocasionada por mareas terrestres (MT, en rojo) y mareas atmosféricas (MA, en gris), que actúan como mecanismos independientes



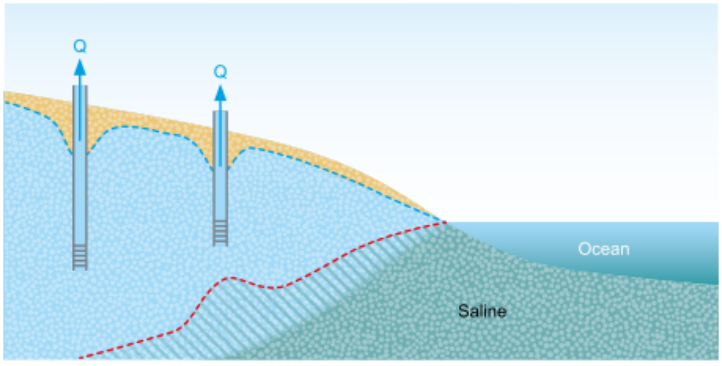
Nota. Ligeramente modificado de Rau et al. (2022). *Gravitational forces* = fuerzas gravitacionales; *time (days)* = tiempo (días); *piezometric head* = carga piezométrica; *confining layer* = estrato confinante; *semi confined subsurface* = subsuelo semiconfinado; *screen* = rejilla; *gravity induced directional strain* = deformación direccional inducida por la gravedad.

5. Evaluación del riesgo de IAS en los pozos costeros

Cuando el agua dulce se bombea a un ritmo mayor al cual el acuífero se recarga, el volumen perdido de agua dulce puede compensarse con la entrada de agua marina. Los pozos que se localizan en la vecindad de la interfase agua dulce/agua salada están expuestos a un riesgo inmediato de salinización, especialmente si el agua marina está almacenada en el acuífero que subyace al pozo (Figura 8).

Figura 8

Intrusión de agua salada ocasionada por bombeo en un acuífero costero

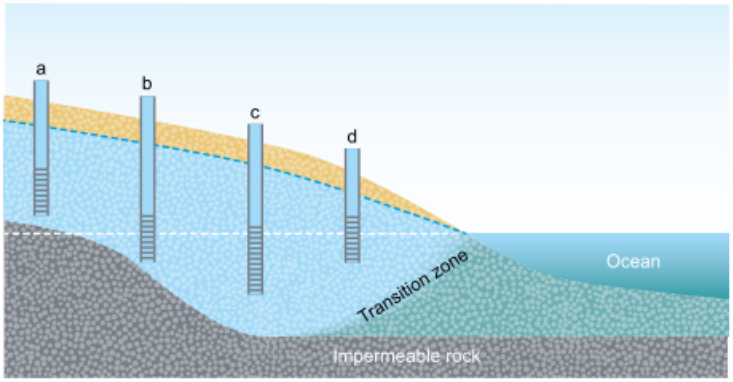


Nota. El pozo más cercano a la costa tiende a desarrollar la intrusión cónica de agua salada. *Saline* = salino; *ocean* = océano. Tomado de Post et al. (2018).

Este es el escenario hidrogeológico típico para la intrusión cónica de agua salada (upconing) previamente descrito. Custodio y Bruggeman (1987) aportaron reglas aproximadas para

estimar el riesgo de IAS según la localización de los pozos en relación con la línea de costa (Figura 9):

Figura 9
Riesgo de IAS para pozos ubicados a diferentes distancias de la línea de costa



Nota. Ocean = océano; *transition zone* = zona de transición (interfase); *impermeable rock* = roca impermeable. Tomado de Post et al. (2018).

El pozo *a* se ubica lejos de la costa y todo el espesor del acuífero está por encima del nivel del mar. No existe un riesgo directo de salinización, aunque una fuerte extracción causará un descenso de la superficie freática, disminuirá el flujo hacia la costa, lo que a su vez aumentará la vulnerabilidad de las zonas siguientes.

El pozo *b* está lejos de la costa y de la cuña de agua salada, pero parte del acuífero está bajo el nivel del mar. Una explotación prolongada y superior a la recarga natural puede inducir la intrusión de la interfase con lo que el agua salada podría llegar a alcanzar la captación.

El pozo *c* está cerca de la costa, pero separado de la interfase. El bombeo fuerte y prolongado puede terminar provocando el avance de la interfase.

El pozo *d* está sobre la interfase, perforado sobre la cuña de agua salada. El riesgo de IAS es muy alto, aun con un bombeo pequeño. El descenso de la superficie freática causado por cualquier bombeo, aunque no sea un caudal elevado, causará el consiguiente ascenso de la interfase, pudiendo llegar a la extracción de agua salada.

Como la posición de la interfase responde a un equilibrio entre la altura de la columna de agua dulce y la de agua salada, es evidente que cualquier disminución de la altura del agua dulce ocasionará una elevación de la interfase.

6. Gestión hidrogeológica de acuíferos costeros con alto riesgo de IAS

Algunas de las mejores prácticas de gestión en acuíferos costeros con alto riesgo por IAS son las siguientes:

a) El estudio hidrogeológico realizado previo a la construcción del pozo mecánico de agua debe estar enfocado hacia la presencia potencial de IAS en el acuífero costero. La información de pozos mecánicos de agua construidos con anterioridad resulta fundamental para la elaboración del modelo hidrogeológico que permita orientar eficientemente la construcción de pozos nuevos.

b) Para seleccionar el sitio donde se propone construir el pozo de agua debe evitarse perforar en lugares adyacentes a la línea de costa,

particularmente dentro de los primeros 50 metros.

c) En cuanto a definir la profundidad del pozo, no se recomienda perforar a grandes profundidades en lugares vecinos a la costa. La profundidad a la interfase agua dulce/agua salada puede variar localmente por lo que debe utilizarse el conocimiento local basado en experiencias anteriores, así como levantamientos geoeléctricos, en cuanto a la probable profundidad a la que puede interceptarse el agua salada. Pueden emplearse los modelos predictivos descritos con anterioridad en este artículo, aunque el contexto hidrogeológico costero en el mundo real puede variar significativamente en relación con estos modelos idealizados.

d) Se recomienda implementar un monitoreo hidrogeológico *durante la perforación del pozo*. Deben utilizarse medidores portátiles de calidad de agua que evalúan SDT, conductividad eléctrica y salinidad para el monitoreo de la calidad de agua que se intercepta durante la perforación. Si se registra un incremento significativo en los parámetros de calidad de agua durante la perforación debe detenerse esta actividad y evaluar la concentración de cloruro en el agua subterránea. En caso de haber interceptado una zona con agua salada debe sellarse el pozo por debajo de cierta profundidad para impedir que el agua salada penetre el acuífero somero de agua dulce.

e) En varias zonas costeras se ha documentado que por cada 1 metro de columna de agua dulce que se extrae la interfase de agua salada se eleva 12 metros por lo que deben instalarse bombas de baja capacidad e implementarse un monitoreo detallado del bombeo para establecer el caudal de agua dulce que puede bombearse en la costa de manera segura y sin que se dispare la intrusión de agua salada en el pozo.

f) En lugares donde se conozca la profundidad de la interfase los pozos deben perforarse a profundidad pequeña y sellarse muy por encima de la interfase, instalando la rejilla en los tramos superiores.

g) Guatemala carece de un contexto regulatorio para el desarrollo de aguas subterráneas en acuíferos costeros que incluya el espaciamiento adecuado de los pozos según el contexto hidrogeológico de cada lugar costero, el monitoreo de niveles y calidad de agua subterránea, el uso de la tierra, así como los factores socioeconómicos de la zona. Se recomienda promover una Norma para el desarrollo de acuíferos costeros tomando como referencia y fortaleciendo las pautas hidrogeológicas establecidas en Costa Rica (La Gaceta, 2012).

Contribución del autor

El autor único es responsable de la totalidad de la concepción, investigación, análisis y redacción de este manuscrito.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

Custodio, E., & Bruggeman, G. A. (1987). *Groundwater problems in coastal areas* (Studies and Reports in Hydrology, 45). UNESCO.

Gilli, É., Mangan, C., & Mudry, J. (2012). *Hydrogeology: Objectives, methods, applications*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b12932

Glover, R. E. (1959). The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer. *Journal of Geophysical*

Research, 64(4), 457–459. https://doi.org/10.1029/JZ064i004p00457

Hubbert, M. K. (1940). The theory of ground-water motion. *The Journal of Geology, 48*(8), 785–944. https://doi.org/10.1086/624930

INOWAS. (2018, 9 de abril). *T09. Simple saltwater intrusion equations*. https://www.inowas.com/tools/t09-simple-saltwater-intrusion-equations/

La Gaceta. (2012). Metodologías hidrogeológicas para la evaluación del recurso hídrico (Acuerdo 60-2012), Capítulo IV: Intrusión salina. *La Gaceta, Diario Oficial de Costa Rica*, (147).

McWhorter, D. B., & Sunada, D. K. (1977). *Ground-water hydrology and hydraulics*. Water Resources Publications.

Post, V., Eichholz, M., & Brentführer, R. (2018). *Groundwater management in coastal zones*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

Rau, G. C., McMillan, T. C., Andersen, M. S., & Timms, W. A. (2022). In situ estimation of subsurface hydro-geomechanical properties using the groundwater response to semi-diurnal Earth and atmospheric tides. *Hydrology and Earth System Sciences, 26*(16), 4301–4321. https://doi.org/10.5194/hess-26-4301-2022

Samper, J. (2013). *Hidrología del subsuelo*. Universidade da Coruña.

Sánchez San Román, F. J. (2009). *Agua subterránea en regiones costeras*. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca.

Verruijt, A. (1969). An interface problem with a source and a sink in the heavy fluid. *Journal of Hydrology, 8*(2), 197–206. https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90121-8

Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E. A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. T., & Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources, 51*, 3–26. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004

Sobre los autores

Rudy Machorro Sagastume

Ingeniero geólogo minero por la Universidad de Guanajuato, México, y doctor (Ph. D.) en Hidrogeología y Management por The University of Texas at El Paso (UTEP), Estados Unidos. Es investigador y especialista en hidrogeología, con experiencia en el estudio de los recursos hídricos subterráneos y su gestión. Está vinculado a la Asociación Guatemalteca de Geociencias Ambientales (ASGA) y a organizaciones científicas internacionales, entre ellas la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH) y la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS). Su trayectoria se orienta al desarrollo de estudios hidrogeológicos y a la generación de conocimiento científico para la comprensión, evaluación y gestión de los recursos hídricos subterráneos. Correo: rudy.machorro@yahoo.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5822-1020

CC BY-NC-SA 4.0 Creative Commons

© 2026 Los autores. Este artículo se publica en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra con fines no comerciales, siempre que se cite la autoría y la publicación original en la Revista Guatemalteca de Ciencias de la Tierra y que las obras derivadas se distribuyan con la misma licencia.