



Riesgos de problemas de infiltración de suelos en la cuenca del río Javita, Ecuador

Risks of soil infiltration problems in the Javita river basin, Ecuador

 Carlos Balmaseda-Espinosa*,  Daniel Ponce de León Lima,  Nadia Quevedo Pinos

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador.

RESUMEN: Se evalúan los posibles riesgos de disminución de la permeabilidad y problemas de infiltración en suelos asociados a la calidad del agua subterránea en la cuenca del río Javita (Península de Santa Elena, Ecuador), mediante tres indicadores: Índice de Permeabilidad (PI), Relación de Adsorción de Sodio (SAR/SARx) Relación Catiónica de Estabilidad Estructural (CROSS). Se realizaron tres campañas de muestreo (mayo, agosto y diciembre de 2024) en 25 pozos (20 en diciembre por estiaje), bajo las normas INEN 2196 y 2176. A las muestras se les determinaron pH, Conductividad Eléctrica (EC) y cationes/aniones (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-). Los resultados muestran alta variabilidad espacial y temporal (coeficientes de variación elevados) y una clasificación del PI en la Clase II (Buena) en los tres muestreos (medias: 50,9; 54,9; 40,2 %), esto sugiere que esas aguas no afectarían la permeabilidad. En la evaluación SAR/SARx/CROSS vs. EC predomina la categoría de “Ninguna” restricción, aunque nueve pozos presentan restricción “Leve a Moderada”, en mayo y/o diciembre, varios de ellos (P-14, P-16, P-17, P-22, P-23, P-24) mantienen esa condición en ambos muestreos. En diciembre, las observaciones disponibles clasifican sin restricción, pero la ausencia de datos en cinco pozos exige cautela en el manejo de estas aguas. En conclusión, hay ausencia de riesgo actual de sodicidad o disminución de la permeabilidad, se recomienda el seguimiento de los pozos con restricción “Leve a Moderada” y medidas de manejo para mantener la salinidad efectiva del bulbo húmedo y minimizar el potencial de dispersión y sellado superficial.

Palabras clave: calidad del agua, conductividad eléctrica, CROSS, SAR, sodicidad.

ABSTRACT: This study evaluates the potential risks of decreased permeability and infiltration problems in agricultural soils associated with groundwater quality in the Javita River basin (Santa Elena Peninsula, Ecuador), using three indicators: Doneen Permeability Index (PI), Sodium Adsorption Ratio (SAR/SARx), and Cation Ratio of Structural Stability (CROSS). Three sampling campaigns were conducted (May, August, and December 2024) in 25 wells (20 in December due to the dry season), following INEN standards 2196 and 2176. pH, Electrical Conductivity (EC), and cation/anion concentrations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-) were determined in the samples. The results show high spatial and temporal variability (high coefficients of variation) and a PI classification of Class II (Good) in all three sampling periods (means: 50.9, 54.9, and 40.2 %), suggesting that these waters would not affect permeability. In the SAR/SARx/CROSS vs. EC evaluation, the “None” restriction category predominates, although nine wells present “Slight to Moderate” restriction in May and/or December. Several of these (P-14, P-16, P-17, P-22, P-23, and P-24) maintain this condition in both sampling periods. In December, the available observations are classified as having no restriction, but the absence of data for five wells requires caution in the handling of these waters. In summary, there is no current risk of sodicity or decreased permeability; monitoring of wells with “Slight to Moderate” restrictions and management measures to maintain effective wet-bulb salinity and minimize the potential for surface dispersion and sealing are recommended.

Key words: CROSS, electrical conductivity, SAR, sodicity, water quality.

*Autor para correspondencia: cbalmaseda@upse.edu.ec

Recibido: 10/12/2025

Aceptado: 14/04/2026

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de autores: Conceptualización, Investigación, Curación de datos: Carlos Balmaseda-Espinosa; Daniel Ponce de León Lima y Nadia Quevedo Pinos. **Metodología, Redacción - borrador original:** Carlos Balmaseda-Espinosa. **Supervisión:** Daniel Ponce de León Lima, Nadia Quevedo Pinos.

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para la agricultura, y su calidad es tan importante como la cantidad disponible para asegurar la productividad de los cultivos y la sostenibilidad a largo plazo del recurso suelo. La presencia y concentración de sales disueltas en el agua de riego pueden influir directamente en el crecimiento de las plantas. Además, el uso continuado de agua con exceso de sales disueltas puede alterar la estructura del suelo, lo cual provoca la disminución de la permeabilidad y la aireación, aspectos vitales para el desarrollo de las raíces de los cultivos y el drenaje adecuado (1).

La evaluación de la aptitud del agua para riego se fundamenta en varios criterios, estos incluyen la salinidad, comúnmente cuantificada mediante la Conductividad Eléctrica (EC, por sus siglas en inglés); el riesgo de sodicidad, expresado a través de la Relación de Adsorción de Sodio (SAR, por sus siglas en inglés) (2-6); la posible toxicidad provocada por iones específicos, por ejemplo, cloruros, sulfatos y boro (7) y los daños que pueden causar por obstrucción de elementos del sistema de riego (8-12). Estos factores, interrelacionados, contribuyen a determinar la aptitud del agua para usos en la agricultura y sus potenciales consecuencias sobre la salud de los suelos y el rendimiento agrícola de los cultivos.

El Índice de Permeabilidad (PI, por sus siglas en inglés) (13), es una herramienta analítica diseñada específicamente para evaluar el impacto a largo plazo del agua de riego en la permeabilidad de los suelos (14). La permeabilidad es un atributo crítico que asegura un drenaje eficiente y una aireación adecuada en la zona radicular de las plantas.

El Índice de Permeabilidad considera la interacción de iones específicos, como el sodio y el bicarbonato, en relación con el calcio y el magnesio, presentes en el agua que pueden influir en la estructura del suelo. El uso prolongado de agua con un PI desfavorable puede conducir a la dispersión de las partículas del suelo, lo que reduce significativamente la permeabilidad y provoca problemas como el encharcamiento superficial y la deficiencia de oxígeno en las raíces de los cultivos (1).

$$PI = \frac{[Na^+] + \sqrt{[HCO_3^-]}}{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+]} * 100$$

Donde: PI es el Índice de Permeabilidad. Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- son las concentraciones de esos iones en mEq L.

El PI se enfoca en la permeabilidad del suelo, por esa razón no es común que se emplee como único indicador para evaluar la calidad de las aguas de riego. Junto a éste se utiliza la SAR que se centra en el riesgo provocado por el sodio. Esta observación conduce a la necesidad de una evaluación multidimensional de la calidad de las aguas de riego. La gestión sostenible del agua en la agricultura debe integrar un conjunto de índices para comprender la interacción compleja de las propiedades químicas del agua y sus efectos acumulativos en la salud del suelo y la productividad de los cultivos con el transcurso del tiempo (15).

La permeabilidad del suelo se incrementa con el aumento de la salinidad en las aguas de riego, mientras que decrece si esas aguas contienen altas concentraciones del ion sodio (16,17). Si la concentración de sodio es muy alta, puede provocar el deterioro de propiedades hidráulicas de los suelos como es la tasa de infiltración, como consecuencias podría traer la formación de costras superficiales, la erosión de los suelos y una aireación deficiente. Finalmente, se degradarían los suelos y disminuirían los rendimientos de los cultivos (18).

La Relación de Adsorción de Sodio (19) ha sido el indicador por excelencia para valorar el riesgo de sodicidad causado por las aguas de riego. En el cálculo de la SAR intervienen los cationes Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Se considera que estos dos últimos cationes tienen un efecto positivo similar sobre la permeabilidad de los suelos.

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

Donde: SAR es la Relación de Adsorción de Sodio. Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} son las concentraciones de esos iones en mEq L.

Al determinar la SAR por la ecuación anterior no se tienen en cuenta las modificaciones que ocurren en los contenidos de calcio después de un riego, de ahí la propuesta de calcular una SAR ajustada que considere el equilibrio esperado por los efectos del dióxido de carbono, del bicarbonato y de la salinidad, sobre la base del supuesto de la existencia en el suelo de minerales de calcio y la ausencia de precipitaciones de magnesio (16).

$$SARx = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca_x^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

Donde: SARx es la Relación de Adsorción de Sodio ajustada. Na^+ , Mg^{2+} son las concentraciones de esos iones en mEq L.

Ca_x^{2+} , concentración final de calcio que permanece en la solución del suelo, al considerar la conductividad del agua, el contenido de bicarbonato en relación al calcio y la presión parcial del dióxido de carbono ejercida en los primeros milímetros del suelo (20).

La SAR no considera al ion potasio como causante de la dispersión de las arcillas del suelo, por otro lado, tampoco diferencia el poder floculante del calcio y el magnesio. Diversos investigadores han demostrado que el potasio tiene un efecto dispersante del suelo de la misma manera que lo hace el sodio. Además, se ha comprobado que el magnesio no contribuye a la floculación en la misma medida en que lo hace el calcio. Una alternativa para superar esta situación es la Relación Catiónica de Estabilidad Estructural (CROSS, por sus siglas en inglés) (18,21,22), dado que los cuatro cationes fundamentales (calcio, magnesio, sodio y potasio) se encuentran en las aguas de riego, en la solución del suelo y en los sitios de intercambio catiónico de los suelos, ya sea por factores naturales o antrópicos (18).

$$CROSS = \frac{[Na^+] + 0,335[K^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + 0,0758[Mg^{2+}]}{2}}}$$

Donde: CROSS es la Relación Catiónica de Estabilidad Estructural. Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} son las concentraciones de esos iones en mEq L.

La CROSS se recomienda en reemplazo de la SAR fundamentalmente para aguas que presenten la conductividad eléctrica (EC) menor a 4 dS/m, y donde las concentraciones de magnesio sean superiores a las de calcio (17).

El objetivo de este trabajo fue evaluar los riesgos potenciales de disminución de la permeabilidad de los suelos de la cuenca del río Javita en la Península de Santa Elena, Ecuador, al emplear aguas de riego, para ello se consideran los indicadores: el Índice de Permeabilidad (PI), la Relación de Adsorción de Sodio (SAR) y la Relación Catiónica de Estabilidad Estructural (CROSS).

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio, como se puede apreciar en la **Figura 1**, está constituida por la cuenca del río Javita, ubicada en la parroquia Colonche, cantón Santa Elena, provincia del mismo nombre. Sus límites son: al norte la cuenca del río Viejo; al sur tiene las cuencas de los ríos Grande, Zapotal y Daular; al este se halla la cordillera Chongón Colonche; mientras que al oeste está el océano Pacífico.

Es una cuenca de la franja costera, es decir, de la vertiente del Pacífico, su característica principal es que posee

acuíferos pobres, aislados y de poca extensión. Pertenecen al sistema hidrográfico Zapotal y su código de acuerdo con la División Hidrográfica del Ecuador es 1244.

El relieve es ondulado, de elevaciones de poca altura. En cuanto al clima, la zona de estudio se divide en dos: en la parte este, cercano a la cordillera Chongón-Colonche, se clasifica como tropical megatérmico seco, mientras que la zona costera es tropical megatérmico semiárido.

Las coordenadas planas de los puntos que definen los extremos Sur-Oeste y Norte-Este de la cuenca del río Javita son: 525000, 9760000 y 580000, 9800000 respectivamente, según el sistema de proyección UTM, zona 17 sur, datum WGS 84.

El río Javita nace en la cordillera del Bosque Protector Chongón-Colonche y corre en sentido este-oeste, su corriente se clasifica como intermitente debido a que solo hay escurrimiento durante las épocas de lluvias. La vegetación original ha sufrido una tala indiscriminada principalmente para usar la madera en la elaboración de carbón vegetal.

Se realizaron tres muestreos en los meses de mayo, agosto y diciembre de 2024 en 25 pozos distribuidos en la zona media de la cuenca donde se concentran las principales áreas de cultivo, como puede observarse en los puntos azules de la [Figura 1](#). Es necesario aclarar que en el muestreo de diciembre solo se analizaron 20 pozos, pues cinco estaban secos producto del estiaje.

Las principales producciones en la zona de estudio son los cultivos de: maíz, cítricos, plátanos, cacao, sandía y maracuyá. Los cuales son sensibles a moderadamente sensibles al estrés provocado por la salinidad de los suelos.

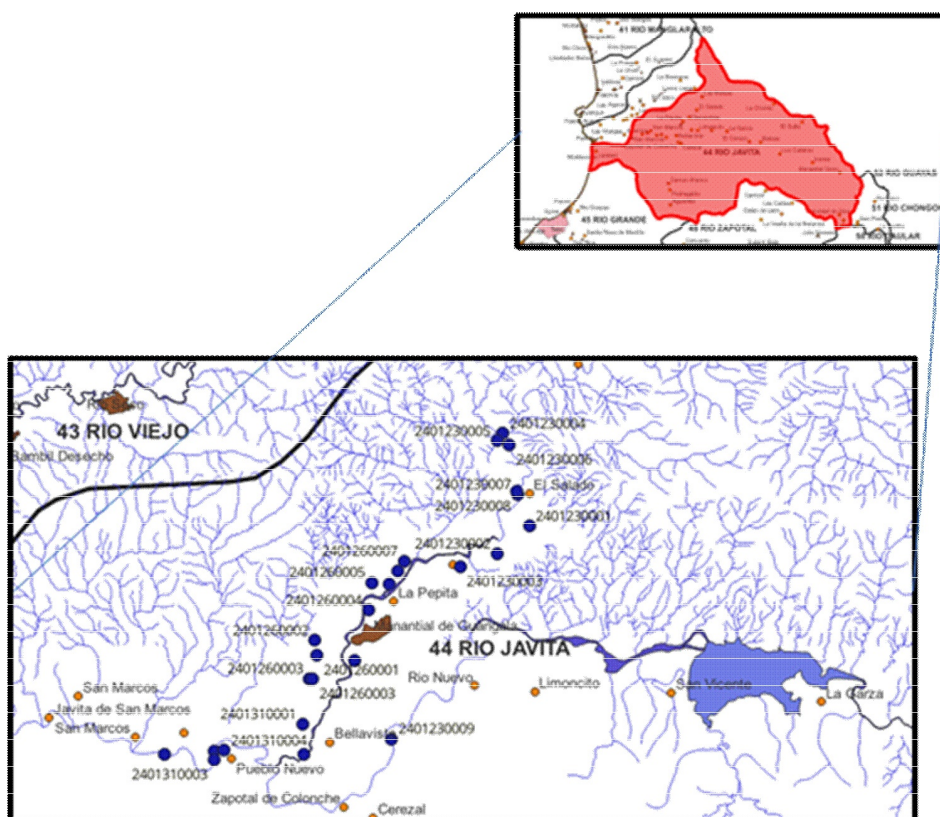


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Javita, área de interés del proyecto. Fuente: Elaborada por los autores

La toma de muestras se realizó según el procedimiento planteado en la Norma Técnica Ecuatoriana 2176:2013 sobre técnicas de muestreo (23), se emplearon recipientes de vidrio de color ámbar, de un litro de capacidad. La manipulación y conservación de las muestras se hizo a partir de la Norma Técnica Ecuatoriana 2169:2013 (23).

En el laboratorio se realizaron las determinaciones que se muestran en la **Tabla 1**, donde además se presentan las técnicas empleadas en cada caso.

Se calculó el error de balance iónico, como parte del control analítico, se considera aceptable el $\pm 5\%$ en estudios hidrogeoquímicos (24). Todas las muestras de mayo y agosto fueron válidas y se obtuvieron valores de error de 2,37, 2,30 %, respectivamente; el muestreo de diciembre mostró 12 balances válidos (el resto sin balance por aniones faltantes); su error fue de -0,38 %.

Con el uso del paquete estadístico InfoStat (25) se determinaron parámetros estadísticos de los aniones y cationes de cada muestreo, entre ellos están la media, la desviación estándar, los valores máximos y mínimos.

La evaluación del riesgo de problemas de infiltración de los suelos provocados por la calidad de las aguas se realizó a partir del Índice de Permeabilidad de Doneen (PI), la Relación

de Adsorción de Sodio (SAR y SARx) y la Relación Catiónica de Estabilidad Estructural (CROSS).

La clasificación empleada para el Índice de Permeabilidad (7,26,27) se presenta en la **Tabla 2**.

Las restricciones de uso de las aguas de riego según la SAR se definen en correspondencia con los valores de la EC determinada en ellas (16,26-28), para lo cual se emplean los criterios que aparecen en la **Tabla 3**. Para clasificar la CROSS se emplean los mismos criterios de la SAR (18,21).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de las aguas estudiadas

En la **Tabla 4** se pueden observar valores medios, mínimos, máximos y desviación estándar de las variables que se utilizaron para determinar los riesgos de problemas de permeabilidad en los suelos regados con las aguas estudiadas. En todos los casos se observa un coeficiente de variación alto, lo cual indica la variabilidad, espacial y temporal, que existe entre las calidades de dichas aguas. Un ejemplo de esto es la conductividad eléctrica, con valores que oscilan desde valores cercanos a 0,7 dS/m hasta algunos superiores a 8 dS/m.

Tabla 1. Procedimientos para el análisis químico de las aguas

Determinación	Técnica
pH	Potenciometría
Conductividad eléctrica (EC)	Conductimetría
Sodio (Na^+)	Espectrofotometría de Absorción atómica
Calcio (Ca^{2+})	
Magnesio (Mg^{2+})	
Potasio (K^+)	
Sulfatos (SO_4^{2-})	Turbidimetría
Carbonatos (CO_3^{2-})	Volumetría
Bicarbonatos (HCO_3^-)	
Cloruros (Cl^-)	

Fuente: Elaborada por los autores

Tabla 2. Clasificación del Índice de Permeabilidad (PI)

PI (%)	Aptitud	Class
> 75	Apta	Class I
25 - 75	Buena	Class II
< 25	No Apta	Class III

Tabla 3. Clasificación de las restricciones de uso de las aguas de riego: SAR/CROSS vs. EC

SAR/SARx/CROSS	Restricciones de uso		
	Ninguna	Leve a Moderada	Severa
		EC en dS/m	
0 - 3	> 0,7	0,7 - 0,2	< 0,2
3 - 6	> 1,2	1,2 - 0,3	< 0,3
6 - 12	> 1,9	1,9 - 0,5	< 0,5
12 - 20	> 2,9	2,9 - 1,3	< 1,3
20 - 40	> 5,0	5,0 - 2,9	< 2,9

Tabla 4. Estadísticas descriptivas de las variables que intervienen en los índices estudiados para los tres muestreos

Muestreo	Estadig.	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻
		(dS/m)			(mEq/L)		
Mayo	n	25	25	25	25	25	25
	Media	2,14	9,34	3,07	9,99	0,32	1,98
	D. E.	1,69	5,69	2,42	10,49	0,16	0,66
	Min.	0,74	2,20	0,92	2,90	0,16	1,28
	Max.	8,14	24,80	10,74	51,93	0,84	4,35
	C. V.	79%	61%	79%	105%	50%	33%
Agosto	n	25	25	25	25	25	25
	Media	1,96	7,76	2,94	8,93	0,24	2,44
	D. E.	1,12	4,37	1,96	6,37	0,09	0,62
	Min.	0,77	2,45	0,90	3,34	0,12	1,50
	Max.	4,90	18,75	8,12	26,80	0,54	3,36
	C. V.	57%	56%	67%	71%	39%	25%
Diciembre	n	20	20	20	20	20	20
	Media	1,94	9,89	2,76	6,89	0,25	2,48
	D. E.	1,57	4,28	1,83	7,23	0,15	1,04
	Min.	0,76	5,86	1,08	2,36	0,09	1,15
	Max.	7,00	20,37	6,82	30,72	0,85	5,38
	C. V.	81%	43%	66%	105%	62%	42%

Fuente: Elaborada por los autores

Índice de Permeabilidad

En la [Tabla 5](#) se presentan los principales estadígrafos relacionados con el Índice de Permeabilidad, en todos los casos la clasificación de las aguas es de Clase II, definida como Buena ([Tabla 2](#)), es decir, se considera que el 100 % de las fuentes estudiadas no afectaría la permeabilidad de los suelos. Los valores del coeficiente de variación confirman la variabilidad espacial y temporal de la calidad de las aguas de los pozos de la cuenca del río Javita.

Un análisis más detallado del PI se puede realizar en la [Figura 2](#), en la que se observa en varios pozos, específicamente los identificados con los números P-15 a P-24, que hay una tendencia a disminuir el PI a valores entre 30 y 40 %, cercanos al límite superior de la Clase III o No Apta, esto podría estar relacionado con el final de la época de estiaje en la zona, con lo cual aumentó la concentración de sales en algunos pozos y otros estuvieron completamente secos.

Riesgo de acumulación de sodio en el suelo

El riesgo de sodicidad en los suelos se determinó a través de los indicadores SAR, SARx y CROSS en combinación con la conductividad eléctrica ([16,26-28](#)), sin embargo, como puede observarse en la [Tabla 6](#), para las condiciones estudiadas prácticamente no hubo diferencias en las clasificaciones obtenidas entre los indicadores.

Magnitud del riesgo

Predominan condiciones de “Ninguna” restricción en los tres muestreos; no obstante, nueve pozos presentan restricciones “Leve a Moderada” en mayo y/o agosto, asociadas a combinaciones de EC baja y SARx/CROSS entre 3 y 5. En el muestreo de diciembre todas las observaciones disponibles clasifican sin restricciones, esto podría explicarse por la disminución de los contenidos de sodio y el incremento de calcio y el magnesio en las aguas.

Persistencia de las condiciones

Los pozos P-14, P-16, P-17, P-22, P-23 y P-24 muestran consistencia de la categoría “Leve a Moderada” en mayo-agosto, por lo que requieren una gestión diferenciada si se riegan suelos sensibles a la dispersión. Estos pozos también presentan disminución de Índice de Permeabilidad en el mes de diciembre.

Interpretación físico-química

De acuerdo con las directivas de FAO, los problemas de infiltración dependen del par EC-SAR: a igual SAR, una EC mayor suele mitigar la dispersión del suelo; a EC baja, el mismo SAR incrementa el riesgo (criterio EC-SARx) ([16,17](#)). El SARx integra efectos de carbonatos/bicarbonatos y el catión Ca²⁺ en solución, y se prefiere para evaluar la infiltración cuando hay contenidos relevantes de HCO₃⁻ y CO₃²⁻ ([29](#)).

Tabla 5. Estadígrafos del Índice de Permeabilidad

Muestreo	n	Mean	S.D.	Min.	Max.	C.V.
Mayo	25	50,90	12,09	27,72	74,52	24%
Agosto	25	54,92	9,40	34,12	69,01	17%
Diciembre	20	40,20	7,18	32,24	58,66	18%

Fuente: Elaborada por los autores

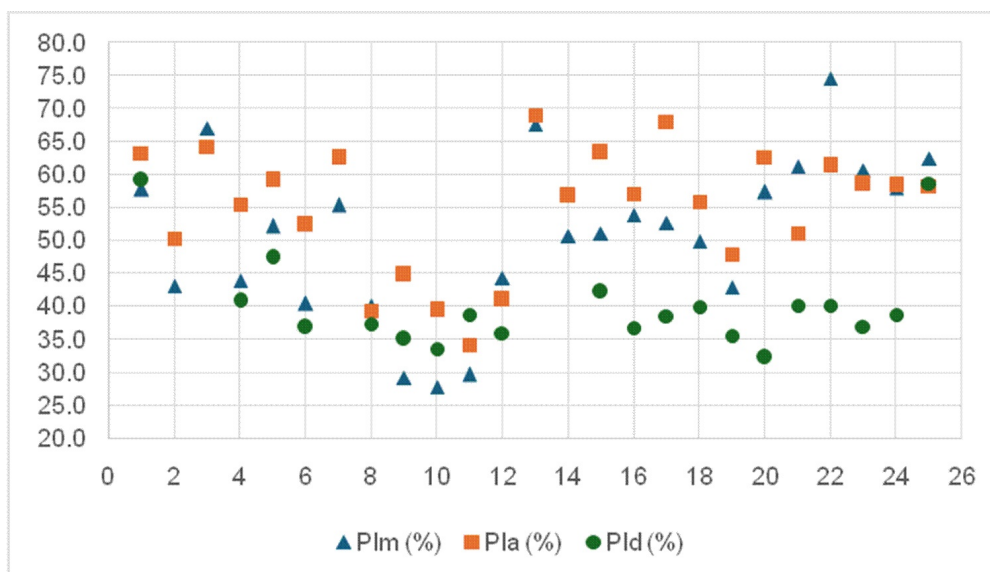


Figura 2. Índice de Permeabilidad de los tres muestreos (Plm: mayo; Pla: agosto; Pld: diciembre)

Tabla 6. Riesgo de acumulación de sodio en los suelos

Pozos	Restricciones de uso								
	Muestreo mayo			Muestreo agosto			Muestreo diciembre		
	SAR	SARx	CROSS	SAR	SARx	CROSS	SAR	SARx	CROSS
P-01	N	N	N	N	N	N	N	N	N
P-02	N	L a M	L a M	N	N	N	SD	SD	SD
P-03	N	N	N	N	N	N	SD	SD	SD
P-04	N	N	N	N	N	N	N	N	N
P-05	N	N	N	N	N	N	N	N	N
P-06	N	N	N	N	N	N	N	N	N
P-07	N	N	N	N	N	N	SD	SD	SD
P-08	N	N	N	N	N	N	N	N	N
P-09	N	N	N	N	N	N	N	N	N
P-10	N	N	N	N	N	N	N	N	N
P-11	N	N	N	N	N	N	N	N	N
P-12	N	N	N	N	N	N	N	N	N
P-13	N	N	N	N	N	N	SD	SD	SD
P-14	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	SD	SD	SD
P-15	N	N	N	L a M	L a M	L a M	N	N	N
P-16	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	N	N	N
P-17	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	N	N	N
P-18	N	N	N	N	N	N	N	N	N
P-19	N	N	N	N	N	N	N	N	N
P-20	N	N	L a M	L a M	L a M	L a M	N	N	N
P-21	L a M	L a M	L a M	N	N	N	N	N	N
P-22	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	N	N	N
P-23	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	N	N	N
P-24	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	L a M	N	N	N
P-25	N	N	N	N	N	N	N	N	N

SAR_{Corr.}: SARx; N: Ninguna; L a M: Leve a Moderada; SD: Sin Datos. Fuente: Elaborada por los autores

Relación Catiónica de Estabilidad Estructural (CROSS)

Este índice incorpora el poder dispersivo del catión K^+ , además del conocido por el Na^+ y el contraste en la floculación provocada por el Mg^{2+} que no se considera de igual influencia que el Ca^{2+} . Ofrece una medida más integral de la estabilidad estructural del suelo frente al agua de riego; se utiliza como alternativa al SAR (18,21,30), sin embargo, en este estudio los resultados de su clasificación no difieren del obtenido con el SARx.

Determinación de restricciones de uso para evitar problemas de infiltración

Con base en los datos de laboratorio y los criterios para definir las clases de restricciones que aparecen en la [Tabla 3](#) se plantea lo siguiente:

- Categoría “Ninguna”: son aguas de esta cuenca con $EC \geq 1,3-1,5$ dS/m y $SAR/SARx/CROSS \leq 5-6$; resultan aptas para suelos franco-arenosos a franco-limosos, sin evidencias de sellado, siempre que se mantenga la salinidad efectiva del bulbo húmedo (evitar diluciones bruscas por lluvias o mezclas de aguas).
- Categoría “Leve a Moderada”: requieren precaución en el manejo del riego en suelos con arcillas expandibles o con aguas de riego con EC baja. Se recomienda elevar el Ca^{2+} (enmiendas cálcicas, por ejemplo, con yeso agrícola como portador o acidificación controlada para disolver carbonatos), evitar descensos de la EC por mezclas de aguas, y ajustar láminas y tiempos de riego.

Todas las muestras disponibles del muestreo de diciembre clasifican en la categoría “Ninguna”, sin embargo, la ausencia de datos en cinco pozos impone ver esos resultados con cautela. En estiajes prolongados pueden aumentar las sales en el perfil del suelo, por ello el manejo del riego debe sostener una conductividad eléctrica en el suelo compatible con el umbral electrolítico del sistema suelo-agua local (31).

La clasificación de varios pozos en la categoría “Leve a Moderada” por riesgo de problemas de infiltración indica que estas aguas pueden utilizarse en riego, pero con precaución, ya que pueden favorecer la dispersión de las arcillas, el sellado superficial, la reducción de macroporos y, en consecuencia, menor velocidad de infiltración y una distribución menos uniforme del agua en el perfil del suelo. Este proceso disminuye la eficiencia del riego y limita el lavado de las sales. En cultivos como maíz y sandía, traerá problemas de emergencia, y estrés hídrico en fases críticas de desarrollo. En cítricos, el efecto puede ser más severo y acumulativo, debido a que la menor infiltración y la concentración de sales en la zona de las raíces limitan el vigor vegetativo y la calidad comercial de los frutos. En plátanos por la elevada demanda hídrica y sensibilidad a la degradación física del suelo, la disminución de la infiltración puede afectar el crecimiento, el desarrollo del área foliar y el peso del racimo. En conjunto, estos resultados sugieren que, aunque no se evidencia una limitación severa generalizada,

los pozos con restricción “Leve a Moderada” requieren monitoreo y prácticas de manejo orientadas a conservar la estabilidad estructural del suelo y la eficiencia del riego, particularmente en cultivos permanentes o de alta exigencia hídrica (32-36).

Para mantener una conductividad eléctrica estable en el bulbo húmedo y minimizar picos de baja concentración, se sugieren sistemas de riego localizado (por ejemplo, goteo o microaspersión).

Se deben evitar diluciones súbitas de la conductividad eléctrica del agua de riego, es decir, por mezclas con aguas de muy baja salinidad o riegos con lluvia intercalada. Las fracciones de lavado deben ser moderadas, aplicadas cuando el suelo esté con una humedad adecuada, estructuralmente estable, para no superar el umbral de dispersión.

Para mejorar la porosidad superficial y resistencia al sellado se deben mantener coberturas orgánicas (rastros, abonos verdes) y labranza mínima; estas prácticas no sustituyen el control iónico, pero amortiguan la disminución de la infiltración

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Las aguas de los pozos estudiados no constituyen un riesgo actual para la acumulación de sodio en los suelos y la consiguiente disminución de su permeabilidad, de acuerdo a los indicadores empleados y los datos obtenidos en los tres muestreos.
2. Los pozos que permanecen en la categoría “Leve a Moderada” se le debe dar seguimiento por la potencial disminución de su Índice de Permeabilidad en épocas de estiaje.
3. Para complementar el estudio de evaluación físico - química de las aguas de riego se sugiere la realización de estudios de caracterización física de los suelos de la cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

1. Jadhav AB, V.N.Nale, D.S.Potdar. Consequences of Irrigation Water and Soil Quality: An Overview. Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2025;11(1):435-53. Available from: <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2025/v11i1494>
2. Anyango GW, Bhowmick GD, Sahoo Bhattacharya N. A critical review of irrigation water quality index and water quality management practices in micro-irrigation for efficient policy making. Desalination and Water Treatment. 2024;318:100304. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100304>
3. Avelar-Roblero JU, Ortega-Escobar HM, Mancilla-Villa OR, Khalil-Gardezi A, Mendoza-Saldivar I, Sánchez-Bernal EI, et al. Variación de la calidad del agua en el cauce principal de la cuenca del río Pánuco. Terra Latinoamericana. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.; 2023;41. Available from: <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1601>

4. Diouf OC, Sarr HK, Diedhiou M, Weihermüller L, Dieng NM, Faye SC, *et al.* Groundwater Quality for Irrigation Purposes in the Diass Horst System in Senegal. *Water*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 2022;14(19):3002. Available from: <https://doi.org/10.3390/w14193002>
5. M'nassri S, El Amri A, Nasri N, Majdoub R. Estimation of irrigation water quality index in a semi-arid environment using data-driven approach. *Water Supply*. 2022;22(5):5161-75. Available from: <https://doi.org/10.2166/ws.2022.157>
6. Rodríguez Ayala S, Jaramillo Castro SA, Zurita Calle LD, Valdiviezo Aguilar AG, Choloquina C. Evaluación de la calidad del agua de riego proveniente de la Acequia Tilipulo Enríquez-Cotopaxi mediante la relación de absorción de sodio (RAS). *Revista Politécnica*. 2022;49(2):55-64. Available from: <https://doi.org/10.33333/rp.vol49n2.06>
7. Egbueri JC, Mgbenu CN, Digwo DC, Nnyigide CS. A multi-criteria water quality evaluation for human consumption, irrigation and industrial purposes in Umunya area, southeastern Nigeria. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. Taylor & Francis; 2023;103(14):3351-75. Available from: <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1907360>
8. Ahmed S, Sultan MW, Alam M, Hussain A, Qureshi F, Khurshid S. Evaluation of corrosive behaviour and scaling potential of shallow water aquifer using corrosion indices and geospatial approaches in regions of the Yamuna river basin. *Journal of King Saud University - Science*. 2021;33(1):101237. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101237>
9. Balkrishna A, Ghosh S, Nagose A, Joshi D, Singh S, Kumud, *et al.* Evaluation of suitability analysis of gangetic water from upper, middle, and lower ganga rivers. *bioRxiv*; 2024. p. 2024.02.28.582642. Available from: <https://doi.org/10.1101/2024.02.28.582642>
10. Barceló-Quintal I, Espejo-Montes F, Gómez-Núñez J, Gómez-Salazar S, Solís-Correa H. Determinación del índice de Langelier del agua del arroyo río Puerta Grande en la CDMX. *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*. 2023;27(3):63-84. Available from: <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/367>
11. Langelier WF. The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment. *Journal AWWA*. 1936;28(10):1500-21. Available from: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1936.tb13785.x>
12. Nascimento DA, Becheleni EM de A, Lima LA de. Índice de saturação de águas duras do norte de Minas Gerais por Phreeqc e Langelier. *Revista de Gestão de Água da América Latina [Internet]*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRHidro; 2024 [citado 20 de agosto de 2025];21(2024). Available from: <https://www.abrh.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/881>
13. Doneen L. The influence of crop and soil on percolating water. En: In Proc 1961 Biennial conference on Groundwater recharge. 1962. p. 156-63. Available from: <https://www.google.com>
14. Dasappa B, Kambale JB, Hadimani DK. Evaluation of Groundwater Quality for Irrigation Using GIS in Northeastern Karnataka, India. *IntJCurrMicrobiolAppSci*. Excellent Publishers; 2023;12(6):251-9. Available from: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2023.1206.031>
15. Desai S. Assessment of ground water quality for irrigation suitability in south Sindhudurg district using gis technology. *IJAEB*. 2024;09(04):89-97. Available from: <https://doi.org/10.35410/IJAEB.2024.5918>
16. Ayers RS, Westcot DW. Water quality for agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1985. (FAO irrigation and drainage paper). Available from: <https://www.google.com>
17. Drechsel P, Marjani Zadeh S, Pedrero F. Water quality in agriculture: risks and risk mitigation [Internet]. Rome: The Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Water Management Institute; 2023. Available from: <https://doi.org/10.4060/cc7340en>
18. Qadir M, Sposito G, Smith CJ, Oster JD. Reassessing irrigation water quality guidelines for sodicity hazard. *Agricultural Water Management*. 2021;255:107054. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107054>
19. U.S. Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington, DC, USA: U.S. Government Printing Office; 1954. (Agriculture handbook,; vol. Handbook No. 60). Available from: <https://www.google.com>
20. Fuentes Yagüe JL. Técnicas de riego. Vol. 4a edición revisada y ampliada Madrid: Coedición Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación - Ediciones Mundi-Prensa; 2003. Available from: <https://www.casadellibro.com>
21. Oster J, Sposito G, Smith C. Accounting for potassium and magnesium in irrigation water quality assessment. *CalAg*. University of California Agriculture and Natural Resources; 2016;70(2):71-6. Available from: <https://doi.org/10.3733/ca.v070n02p71>
22. Rengasamy P, Marchuk A. Cation ratio of soil structural stability (CROSS). *Soil Res*. 2011;49(3):280. Available from: <https://doi.org/10.1071/SR10105>
23. INEN. AGUA. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas de muestreo. [Internet]. Quito, Ecuador; 2013. Available from: <https://www.normalizacion.gob.ec/>
24. Wang M, Zhang W, Yang P, Feng J, Zhang R, Gao Z, *et al.* Hydrogeochemical Characteristics, Water Quality, and Human Health Risks of Groundwater in Wulian, North China. *Water*. 2023;15(2):359. Available from: <https://doi.org/10.3390/w15020359>
25. Grupo InfoStat. InfoStat. [Internet]. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina; 2020. Available from: <https://www.info-stat.com.ar/>
26. Ouhakki H, El Fallah K, Adiba A, Hamid T, El Mejdoub N. Assessing Groundwater Quality and its Impact on Agricultural Productivity in Morocco. *J Ecol Eng*. 2024;25(9):81-91. Available from: <https://doi.org/10.12911/22998993/190684>

27. Şahin Kiy M, Arslan H. Assessment of groundwater quality for irrigation and drinking using different quality indices and geostatistical methods in Çorum province (Turkey). *Irrigation and Drainage*. 2021;70(4):871-86. Available from: <https://doi.org/10.1002/ird.2593>
28. Ibrahim H, Yaseen ZM, Scholz M, Ali M, Gad M, Elsayed S, et al. Evaluation and Prediction of Groundwater Quality for Irrigation Using an Integrated Water Quality Indices, Machine Learning Models and GIS Approaches: A Representative Case Study. *Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*; 2023;15(4):694. Available from: <https://doi.org/10.3390/w15040694>
29. Lesch SM, Suarez DL. Technical Note: A Short Note on Calculating the Adjusted SAR Index. *Transactions of the ASABE*. St. Joseph, MI: ASABE; 2009;52(2):493-6. Available from: <https://doi.org/10.13031/2013.26842>
30. Dehghanisanij H, Mirlatifi SM, Emami S, Rajabzadeh T. Reducing the clogging of emitters in drip irrigation systems using acid washing and ultrasonic technology. *Sci Rep*. 2025;15(1):12499. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95915-w>
31. Quirk JP, Schofield RK. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. *Journal of Soil Science*. 1955;6(2):163-78. Available from: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1955.tb00841.x>
32. FAO, AWC. Guidelines for brackish water use for agricultural production in the Near East and North Africa region. FAO; 26 de enero de 2023. Available from: <https://doi.org/10.4060/cc3234en>
33. Rengasamy P. Irrigation Water Quality and Soil Structural Stability: A Perspective with Some New Insights. *Agronomy*. 2018;8(5):72. Available from: <https://doi.org/10.3390/agronomy8050072>
34. Tan S, Su X, Jiang X, Yao W, Chen S, Yang Q, et al. Irrigation Salinity Affects Water Infiltration and Hydraulic Parameters of Red Soil. *Agronomy*. 2023;13(10):2627. Available from: <https://doi.org/10.3390/agronomy13102627>
35. Yuan H, Zhang A, Zhu C, Dang H, Zheng C, Zhang J, et al. Saline Water Irrigation Changed the Stability of Soil Aggregates and Crop Yields in a Winter Wheat-Summer Maize Rotation System. *Agronomy*. 2024;14(11):2564. Available from: <https://doi.org/10.3390/agronomy14112564>
36. Zhao Q, Xin M, Ai P, Ma Y. Effects of Continuous Saline Water Irrigation on Soil Salinization Characteristics and Dryland Jujube Tree. *Agronomy*. 2025;15(8):1898. Available from: <https://doi.org/10.3390/agronomy15081898>