

# Salinidad cuantitativa y cualitativa del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde, México

• David Vinicio Carrera-Villacrés\* •

*Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador y Colegio de Postgraduados, México*

\*Autor de correspondencia

• Tania Crisanto-Perrazo •

*Escuela Politécnica Nacional, Ecuador*

• Héctor Ortega-Escobar • Jazmín Ramírez-García • David Espinosa-Victoria •

• Carlos Ramírez-Ayala • Víctor Ruiz-Vera •

*Colegio de Postgraduados, México*

• Martha Velázquez-Machuca •

*Instituto Politécnico Nacional, México*

• Edgar Sánchez-Bernal •

*Universidad del Mar, México*

## Resumen

Carrera-Villacrés, D. V., Crisanto-Perrazo, T., Ortega-Escobar, H., Ramírez-García, J., Espinosa-Victoria, D., Ramírez-Ayala, C., Ruiz-Vera, V., Velázquez-Machuca, M., & Sánchez-Bernal, E. (marzo-abril, 2015). Salinidad cuantitativa y cualitativa del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(2), 69-83.

La investigación se desarrolló en el sistema hidrográfico Santa María-Río Verde, con el objetivo de conocer la evolución y salinidad de las aguas de riego tanto cuantitativa, expresada como conductividad eléctrica, como cualitativa, calculada mediante la relación de adsorción de sodio y magnesio, para posteriormente predecir sus efectos sobre los suelos y cultivos. La investigación fue no experimental transversal descriptiva, con el muestreo a juicio en 69 estaciones, muestreadas desde el invierno de 2009, y primavera y otoño de 2010. Se determinaron 10 mediciones en cada muestra de agua: cationes, aniones, pH y conductividad eléctrica (CE). Se siguió el modelo basado en la alcalinidad para determinar la vía evolutiva que toman las aguas, y se comprobó con un experimento de reconcentración de sales por evaporación. Se calculó el índice de saturación (IS) y las modificaciones de la relación de adsorción de sodio (RAS); éstas fueron, RAS y  $RAS_{aj}$ . El sistema hidrográfico Santa María-Río Verde, de acuerdo con la salinidad cuantitativa, se clasificó en su mayoría de ríos como alta y muy altamente salinas; la salinidad cualitativa más crítica fue la magnésica, en comparación con la sódica, a pesar de que la calcita precipitará. La evolución de las aguas fueron de sulfatadas cálcicas a sulfatadas magnésicas y sódicas. Existe la tendencia a que aumente la concentración y cambie la tipología de la salinidad de las aguas del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde, afectando los suelos y cultivos.

**Palabras clave:** sódica, magnésica, evolución de las aguas, geoestadística.

## Abstract

Carrera-Villacrés, D. V., Crisanto-Perrazo, T., Ortega-Escobar, H., Ramírez-García, J., Espinosa-Victoria, D., Ramírez-Ayala, C., Ruiz-Vera, V., Velázquez-Machuca, M., & Sánchez-Bernal, E. (March-April, 2015). Qualitative and Quantitative Salinity of the Santa María-Verde River Hydrographic System, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(2), 69-83.

This investigation took place in the Santa Maria-Verde River hydrographic system in order to identify the evolution of the salinity of irrigation water. It included both a quantitative (electrical conductivity) and qualitative (calculated using the sodium and magnesium adsorption ratio) analysis in order to predict effects on soil and crops. The investigation used a non-experimental, descriptive cross-sectional design in which 69 stations were sampled from winter 2009 to spring and autumn of 2010. Ten measurements were taken for each water sample, cations, anions, pH and electrical conductivity (CE). An alkalinity model was used to determine the evolution of the waters, which was experimentally verified by re-concentration of salts through evaporation. The saturation index (SI) and changes in the sodium adsorption ratio (SAR and  $SAR_{adj}$ ) were calculated. The salinity of most of the rivers in the Santa Maria-Verde River hydrographic system was classified as high or very high, according to the quantitative analysis. The most critical qualitative salinity was that of magnesium, as compared to sodium, even with the precipitation of calcite. The waters evolved from calcium sulfate to magnesium and sodium sulfate. There was a trend of increasing concentrations and changes in the type of salinity of the waters in the Santa Maria-Verde River hydrographic system, which affects the soils and crops.

**Keywords:** sodium, magnesium, evolution of water, geostatistical.

Recibido: 17/05/2011  
Aceptado: 15/10/2014

## Introducción

La salinidad de los suelos causa graves problemas a la agricultura, por lo que este estudio contribuirá al desarrollo de las regiones áridas y semiáridas que sufren con mayor intensidad dicho fenómeno. Los recursos agronómicos de las regiones áridas y semiáridas representan 60% del territorio mexicano y son los menos explotados, a pesar de que se consideran con un alto potencial agrícola. El sistema hidrográfico Santa María-Río Verde es uno de los más afectados debido a la salinidad de sus suelos. La salinidad en los suelos es posible determinarla a través de la medición de los iones en las aguas de riego, pues cuando se realiza la irrigación de los cultivos, el agua satura el suelo y en ese instante existe un equilibrio químico entre estas dos matrices.

La salinidad cuantitativa se mide a través de la conductividad eléctrica (CE) de las aguas, mientras que la salinidad cualitativa en este trabajo se midió a través de la relaciones de adsorción de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .

La salinidad cuantitativa engloba la salinidad primaria y secundaria; esta última es causada por el hombre debido a las malas prácticas de riego. En la zona de estudio, la salinidad primaria obedece a su pasado geológico, lo cual provoca procesos geoquímicos entre las aguas, suelos y cultivos, que pueden generar graves problemas al incorporarlos a la agricultura, y los empobrece física y químicamente, disminuyendo en especial su fertilidad; en hojas y frutos se presentan daños por la acumulación de iones tóxicos en las células, disminuyendo su tamaño, color y, por tanto, su valor comercial (Shani & Dudley, 2001).

Para la determinación de la evolución salina se realizó un experimento de reconcentración de sales, con el fin de simular lo que sucede en la geografía de la zona de riego de Río Verde por los procesos de evaporación-precipitación. En este experimento se determinó que las sales disueltas en el agua cambian de sulfatadas cálcicas,

que tienen una solubilidad cercana a los  $10 \text{ g l}^{-1}$ , a sulfatadas magnésicas y sódicas, con una solubilidad aproximada de  $350 \text{ g l}^{-1}$ , corroborando los resultados mostrados por Szabolcs (1994), por lo que se consideran aguas con alta energía, impidiendo la absorción de nutrientes en los cultivos.

El objetivo del presente trabajo fue conocer la evolución y concentración de la salinidad de las aguas de riego tanto cuantitativa, expresada como conductividad eléctrica, como cualitativa, calculada a través de la relación de adsorción de sodio y magnesio, para posteriormente predecir sus efectos sobre los suelos y cultivos del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde.

## Materiales y métodos

Este trabajo fue una investigación transversal, no experimental, prospectiva, a juicio del investigador. Transversal, porque se midieron una sola vez variables como características físicas y químicas en un momento dado; no se pretendió evaluar la evolución en el tiempo de las mismas. El estudio fue descriptivo, porque cuenta con un universo de aguas, que se pretendieron describir en función de un grupo de variables y respecto de las cuales no existen hipótesis centrales.

Los criterios del investigador se basaron en la observación de la zona y estudios de calidad de suelos y aguas preliminares realizados por el Colegio de Postgraduados campus Montecillo, Programa de Hidrociencias desde el año 1967 (Grande, Hernández, Aguilera, & Boulaine, 1967).

Respecto a la toma de muestras de agua, el recorrido inició desde los escurrimientos en la Sierra Madre Oriental, en donde nacen los ríos Extorax, Ayutla, Jalpan, Santa María, Río Verde, y terminó en los valles en donde se aprovecha para irrigación, con un total de 69 estaciones. Las muestras se tomaron en manantiales y ríos antes y después de su paso por zonas urbanas, con el fin de conocer el incremento en la salinidad cuantitativa y cualitativa.

En este trabajo, las variables físico-químicas medidas y consideradas para el estudio de la evolución y la salinidad cualitativa de las aguas de riego fueron la concentración de aniones y cationes ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ), el pH y conductividad eléctrica.

Para la determinación de la evolución de la salinidad se realizó un experimento basado en la evaporación del manantial de Media Luna, que es la principal fuente de agua para riego del valle de Río Verde, experimento que comprobó los modelos propuestos por Hardie y Eugster (1970), y por Risacher y Fritz (2009).

El método utilizado para la determinación analítica de la concentración de iones fue el que propone la APHA (1995), es decir, en cada estación de muestreo del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde se tomaron por duplicado muestras de agua con un volumen de 0.5 l. El envase de recolección de la muestra de agua se enjuagó varias veces, con el agua sujeta a muestreo. Los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  se determinaron analíticamente de acuerdo con los métodos 4500-H<sup>+</sup>B, 2510 B, 3500 Ca D, 3500 Na K D, 2320 B, 4500 Ci B, 4500-SO<sub>4</sub> B, 2540 D y 2540 E, respectivamente. Las variables conductividad eléctrica y pH se midieron bajo los parámetros de las normativas oficiales mexicanas NOM-AA-93-1984 y NMX-AA-008-SCFI-2000, respectivamente.

En cuanto a la interpretación de los resultados de la salinidad cuantitativa y cualitativa, se usó el método propuesto por Richards (1962), el cual evalúa la salinidad través de la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de  $\text{Na}^+$ , para después utilizar las clasificaciones y predecir el grado de salinidad y afectación de suelos y cultivos.

Para la elaboración de los mapas de distribución espacial se utilizó la metodología geoes-tadística de Kriging, con la ayuda del *software Arc Gis*, versión 9.3. Webster y Oliver (2007) mencionan que este método presenta excelentes resultados, porque las concentraciones son variables, aleatorias y poseen una continuidad espacial.

## Resultados y discusión

### *La composición iónica de las aguas del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde*

En el cuadro 1 se presentan las concentraciones de cationes y aniones de los muestreos realizados en los años 2009 y 2010 en el sistema hidrográfico Santa María-Río Verde. Los datos mostrados se sometieron a las comprobaciones propuestas por APHA (1995) en lo concerniente a errores aceptables. Al final del cuadro 1 se tienen los principales parámetros estadísticos. También se muestra la variación del pH entre 6.9 y 8.2, existiendo condiciones medias de neutralidad en todas las aguas. Estas condiciones se dan en parte porque el ión  $\text{HCO}_3^-$  es una base débil y el  $\text{CO}_3^{2-}$  es una base fuerte, por lo que el sistema  $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$  es un sistema tampón (Figueruelo & Dávila, 2004).

La salinidad de las aguas continentales se determina mediante cuatro cationes principales:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , y por lo aniones  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , cuya concentración mundial media es de  $120 \text{ mg l}^{-1}$  (Wetzel, 1981), pero varía de manera considerable de un continente a otro, y según la litología de las masas de la tierra. Utilizando los promedios de concentración de los datos del muestreo de aguas en  $\text{Na}^+ / \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} = 0.24$  y  $\text{STD} = 1\ 090.88 \text{ mg l}^{-1}$ , y ubicando los datos en gráfico de Gibbs (1970), tal como se muestra en la figura 1, resulta que las aguas del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde se localizan en la zona donde predomina la evaporación con respecto a la precipitación, lo que al mantenerse la tendencia provocaría un incremento en la concentración y cambiaría la tipología de la salinidad de las aguas y, por tanto, en los suelos.

En la figura 2 se observa la predominancia de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  y su aumento en la concentración en las estaciones de muestreo en el sistema hidrográfico Santa María-Río Verde. Por ejemplo, en el poblado de Peña Blanca, la concentración del  $\text{Ca}^{2+}$  comienza a aumentar, por la acción de

Cuadro 1. Composición iónica, pH, CE, STD, Índice de Saturación (IS), RAS<sub>orig</sub> y RAS<sub>aj</sub> del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde.

Núm.	pH	CE μS cm <sup>-1</sup>	mmol <sub>c</sub> l <sup>-1</sup>										% error	mg l <sup>-1</sup>		IS	RAS <sub>orig</sub>	RAS <sub>aj</sub>
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma		STD				
1	7.7	426.00	2.32	1.42	0.28	0.19	4.21	0.00	3.27	0.68	0.17	4.12	1.04	309.57	0.79	0.20	0.37	
2	8.1	1 700.00	8.20	3.70	4.63	0.27	16.80	0.00	6.73	2.90	6.74	16.37	1.30	1 163.43	1.70	1.90	5.12	
3	7.2	1 272.73	4.21	3.00	4.90	0.43	12.54	0.00	4.22	3.20	4.78	12.20	1.37	850.81	1.02	2.58	5.22	
4	8.2	336.25	2.40	0.40	0.50	0.06	3.36	0.00	2.33	0.80	0.14	3.27	1.41	243.89	0.65	0.42	0.70	
5	7.5	305.45	1.47	0.85	0.65	0.09	3.06	0.00	1.71	1.20	0.07	2.98	1.32	208.50	0.30	0.60	0.79	
6	8.2	337.85	2.36	0.42	0.52	0.08	3.38	0.00	2.36	0.76	0.16	3.28	1.50	246.11	0.90	0.44	0.84	
7	7.7	330.91	1.57	0.96	0.64	0.09	3.26	0.00	1.83	1.26	0.10	3.19	1.09	222.50	0.36	0.57	0.78	
8	7.5	372.00	2.03	1.25	0.21	0.18	3.67	0.00	2.79	0.72	0.08	3.59	1.07	267.46	0.66	0.16	0.27	
9	7.9	308.25	1.66	0.72	0.60	0.08	3.06	0.00	2.03	0.78	0.17	2.98	1.32	218.62	0.61	0.55	0.88	
10	7.7	254.55	1.23	0.72	0.48	0.04	2.47	0.00	1.40	0.95	0.06	2.41	1.23	167.98	0.09	0.49	0.53	
11	7.9	480.50	2.60	1.10	0.92	0.12	4.74	0.00	3.13	1.20	0.27	4.60	1.50	337.81	0.82	0.68	1.23	
12	7.5	509.09	1.76	1.20	1.96	0.12	5.04	0.00	2.81	1.28	0.82	4.91	1.31	355.83	0.59	1.61	2.56	
13	7.4	432.73	1.48	1.02	1.65	0.10	4.25	0.00	2.37	1.08	0.69	4.14	1.31	299.94	0.42	1.48	2.09	
14	7.4	381.82	1.31	0.90	1.45	0.09	3.75	0.00	2.09	0.95	0.61	3.65	1.35	264.55	0.31	1.38	1.81	
15	7.5	352.90	1.87	1.22	0.22	0.18	3.49	0.00	2.69	0.65	0.06	3.40	1.31	254.46	0.61	0.18	0.29	
16	7.8	467.00	2.08	1.65	0.75	0.16	4.64	0.00	2.50	0.84	1.17	4.51	1.42	323.75	0.97	0.55	1.08	
17	7.5	356.36	1.81	0.84	0.82	0.09	3.56	0.00	1.92	0.94	0.60	3.46	1.42	248.15	0.42	0.71	1.01	
18	7.7	324.50	1.30	0.80	0.65	0.25	3.00	0.00	2.37	0.60	0.14	3.11	1.80	233.10	0.39	0.63	0.88	
19	7.9	151.30	0.40	0.64	0.30	0.16	1.50	0.00	1.13	0.22	0.11	1.46	1.25	111.12	-0.35	0.42	0.27	
20	7.7	232.20	0.52	1.07	0.38	0.32	2.29	0.00	1.72	0.42	0.08	2.22	1.55	168.36	-0.14	0.43	0.37	
21	7.6	723.00	2.53	4.20	0.15	0.26	7.14	0.00	5.39	0.60	0.96	6.95	1.38	511.42	1.00	0.08	0.16	
22	8.0	675.50	3.11	2.30	1.10	0.20	6.71	0.00	3.56	1.12	1.86	6.54	1.30	469.57	1.08	0.67	1.39	
23	7.6	585.45	2.03	1.40	2.26	0.14	5.83	0.00	3.26	1.48	0.95	5.69	1.22	412.14	0.73	1.73	2.99	
24	7.9	645.50	2.89	2.30	1.05	0.18	6.42	0.00	3.46	1.16	1.62	6.24	1.44	447.00	1.20	0.65	1.43	
25	7.6	534.55	1.81	1.26	2.03	0.13	5.23	0.00	2.90	1.33	0.86	5.09	1.36	368.75	0.62	1.64	2.66	
26	7.5	1 088.50	6.48	4.00	0.20	0.08	10.76	0.00	4.92	0.80	4.75	10.47	1.37	742.88	1.46	0.09	0.22	
27	7.2	890.91	4.97	2.17	1.40	0.25	8.79	0.00	3.68	1.80	3.07	8.55	1.38	603.74	1.07	0.74	1.53	
28	7.1	1061.50	6.09	4.06	0.22	0.10	10.47	0.00	5.10	0.82	4.27	10.19	1.36	725.70	1.50	0.10	0.24	
29	7.2	890.91	4.67	2.26	1.55	0.30	8.78	0.00	3.60	1.86	3.10	8.56	1.27	602.91	1.03	0.83	1.69	
30	7.5	1 770.00	12.09	4.71	0.42	0.26	17.48	0.00	5.77	1.27	9.96	17.00	1.39	1 194.82	1.62	0.14	0.38	
31	7.0	2 258.00	13.39	8.21	0.38	0.32	22.30	0.00	7.03	2.12	12.58	21.73	1.30	1 497.58	1.69	0.12	0.31	
32	7.0	2 265.00	13.26	8.43	0.36	0.32	22.37	0.00	7.15	2.08	12.58	21.81	1.27	1 503.09	1.69	0.11	0.29	
33	7.1	2077.00	12.02	8.10	0.30	0.12	20.54	0.00	6.04	1.02	12.94	20.00	1.33	1 377.11	1.62	0.09	0.25	
34	7.3	1909.09	10.11	8.23	0.35	0.17	18.86	0.00	5.76	1.13	11.48	18.37	1.32	1 260.21	1.51	0.12	0.29	
35	7.3	2 009.00	11.59	8.00	0.18	0.08	19.85	0.00	4.80	1.54	12.98	19.32	1.35	1 307.65	1.52	0.06	0.14	
36	7.2	1 909.09	10.15	8.24	0.33	0.18	18.90	0.00	5.80	1.14	11.46	18.40	1.34	1 262.90	1.51	0.11	0.27	
37	7.2	1 909.09	10.17	8.22	0.32	0.17	18.88	0.00	5.83	1.12	11.44	18.39	1.31	1 262.60	1.52	0.11	0.27	
38	7.5	1 771.00	12.60	4.28	0.36	0.25	17.49	0.00	5.83	1.26	9.92	17.01	1.39	1 199.37	1.64	0.12	0.33	

Cuadro 1 (continuación). Composición iónica, pH, CE, STD, Índice de Saturación (IS), RAS<sub>orig</sub> y RAS<sub>aj</sub> del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde.

Núm.	pH	CE μS cm <sup>-1</sup>	mmol <sub>c</sub> l <sup>-1</sup>										% error	mg l <sup>-1</sup> STD	IS	RAS <sub>orig</sub>	RAS <sub>aj</sub>
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma					
39	7.3	1 901.00	13.55	4.56	0.38	0.28	18.77	0.00	6.23	1.42	10.61	18.26	1.38	1 286.72	1.68	0.13	0.34
40	7.6	2 221.00	12.27	8.67	0.82	0.16	21.92	0.00	7.82	1.40	12.13	21.35	1.33	1 485.54	1.69	0.25	0.68
41	7.9	2 290.91	7.36	12.00	2.88	0.38	22.62	0.00	11.81	2.62	7.59	22.02	1.34	1 552.44	1.64	0.93	2.44
42	7.0	2 047.00	8.00	11.99	0.18	0.08	20.25	0.00	4.40	1.22	14.09	19.71	1.35	1 301.74	1.24	0.06	0.13
43	7.0	1 400.00	7.10	4.69	1.76	0.28	13.83	0.00	5.30	1.60	6.56	13.46	1.36	945.88	1.39	0.72	1.73
44	7.7	2 145.50	11.80	8.50	0.78	0.16	21.24	0.00	7.70	1.20	11.82	20.72	1.24	1 444.04	1.65	0.24	0.65
45	7.5	1 272.73	6.60	4.09	1.60	0.25	12.54	0.00	4.73	1.45	6.02	12.20	1.37	857.68	1.30	0.69	1.59
46	8.2	2 374.50	15.65	7.00	0.60	0.16	23.41	0.00	6.48	1.60	14.71	22.79	1.35	1 577.21	1.90	0.18	0.52
47	7.6	1 463.64	7.52	4.75	1.85	0.30	14.42	0.00	4.78	1.60	7.68	14.06	1.26	979.94	1.35	0.75	1.76
48	7.8	2 163.64	5.90	12.53	2.58	0.32	21.33	0.00	8.40	2.42	9.86	20.68	1.55	1 414.23	1.41	0.85	2.05
49	7.6	674.50	2.87	2.26	1.24	0.25	6.62	0.00	4.02	1.60	0.80	6.42	1.57	463.49	1.01	0.77	1.56
50	7.4	644.50	3.00	1.96	1.15	0.21	6.32	0.00	4.12	1.70	0.32	6.14	1.41	445.81	1.01	0.73	1.46
51	7.2	2 306.50	14.98	6.39	1.30	0.14	22.81	0.00	3.70	2.27	16.28	22.25	1.25	1 501.24	1.46	0.40	0.98
52	7.4	2 418.18	7.36	13.12	2.90	0.52	23.90	0.00	8.29	3.12	11.78	23.19	1.51	1 576.16	1.48	0.91	2.25
53	7.7	2 729.00	16.76	8.90	1.20	0.10	26.96	0.00	4.50	2.60	19.16	26.26	1.32	1 762.52	1.56	0.34	0.86
54	7.9	2 418.18	7.70	12.89	2.86	0.45	23.90	0.00	8.89	3.10	11.28	23.27	1.34	1 588.41	1.53	0.89	2.25
55	7.7	2 485.50	14.27	9.12	1.12	0.08	24.59	0.00	6.74	2.60	14.61	23.95	1.32	1 630.88	1.65	0.33	0.87
56	7.8	2 290.91	7.23	12.30	2.68	0.40	22.61	0.00	10.53	2.92	8.59	22.04	1.28	1 530.22	1.58	0.86	2.21
57	7.2	4 730.00	27.79	9.56	9.00	0.36	46.71	0.00	4.40	7.60	33.48	45.48	1.33	3 040.00	1.71	2.08	5.65
58	7.6	3 175.50	19.05	8.82	3.31	0.22	31.40	0.00	5.18	3.18	22.23	30.59	1.31	2 070.15	1.69	0.89	2.39
59	7.0	3 563.64	9.42	18.90	6.30	0.45	35.07	0.00	9.33	6.02	18.91	34.26	1.17	2 271.73	1.61	1.67	4.38
60	7.8	2 100.00	6.54	11.12	2.76	0.32	20.74	0.00	6.50	3.14	10.46	20.10	1.57	1 352.47	1.35	0.93	2.18
61	6.9	4 200.00	11.11	22.30	7.43	0.64	41.48	0.00	8.61	8.20	23.50	40.31	1.43	2 634.32	1.62	1.82	4.76
62	7.5	1 781.82	5.45	9.43	2.30	0.40	17.58	0.00	5.78	2.62	8.72	17.12	1.33	1 156.71	1.28	0.84	1.92
63	7.2	3 818.18	6.86	20.29	9.80	0.78	37.73	0.00	11.33	7.46	17.86	36.65	1.45	2 453.43	1.60	2.66	6.90
64	7.5	3 844.50	15.80	15.94	5.84	0.34	37.92	0.00	3.80	5.80	27.18	36.78	1.53	2 400.80	1.46	1.47	3.60
65	7.4	3 975.00	16.60	16.80	5.54	0.37	39.31	0.00	3.60	6.40	28.27	38.27	1.34	2 482.98	1.45	1.36	3.32
66	7.2	3 945.45	7.48	20.69	10.12	0.72	39.01	0.00	11.53	7.98	18.40	37.91	1.43	2 532.30	1.59	2.70	6.99
67	7.0	2 418.18	4.66	12.62	6.17	0.45	23.90	0.00	5.38	4.55	13.22	23.15	1.59	1 530.70	1.10	2.10	4.42
68	7.0	5 727.27	6.66	16.00	33.10	0.83	56.59	0.00	10.41	33.50	11.12	55.03	1.40	3 478.18	1.45	9.83	24.08
69	7.3	2 036.36	7.32	11.95	0.70	0.18	20.15	0.00	5.00	3.24	11.30	19.54	1.54	1 277.71	1.27	0.23	0.51
Desv. est.	0.33	1 252.43	5.48	5.73	4.43	0.17	12.37	0.00	2.62	4.22	7.92	12.03	0.12	784.37	0.51	1.28	3.16
CV	0.04	0.75	0.76	0.87	1.84	0.68	0.75		0.51	1.61	0.95	0.75	0.09	0.72	0.44	1.43	1.59
Media	7.5	1 664.76	7.21	6.59	2.40	0.25	16.44	0.00	5.08	2.63	8.29	16.00	1.36	1 090.88	1.17	0.90	1.99
Mediana	7.5	1 770.00	6.60	4.69	1.10	0.20	17.48	0.00	4.78	1.45	7.68	17.00	1.35	1 163.43	1.35	0.65	1.08
Mínimo	6.9	151.30	0.40	0.40	0.15	0.04	1.50	0.00	1.13	0.22	0.06	1.46	1.04	111.12	-0.35	0.06	0.13
Máximo	8.2	5 727.27	27.79	22.30	33.10	0.83	56.59	0.00	11.81	33.50	33.48	55.03	1.80	3 478.18	1.90	9.83	24.08
Moda	7.2	1 909.09	2.03	0.72	0.38	0.08	12.54	0.00	2.37	1.60	0.06	12.20	1.37		1.69		

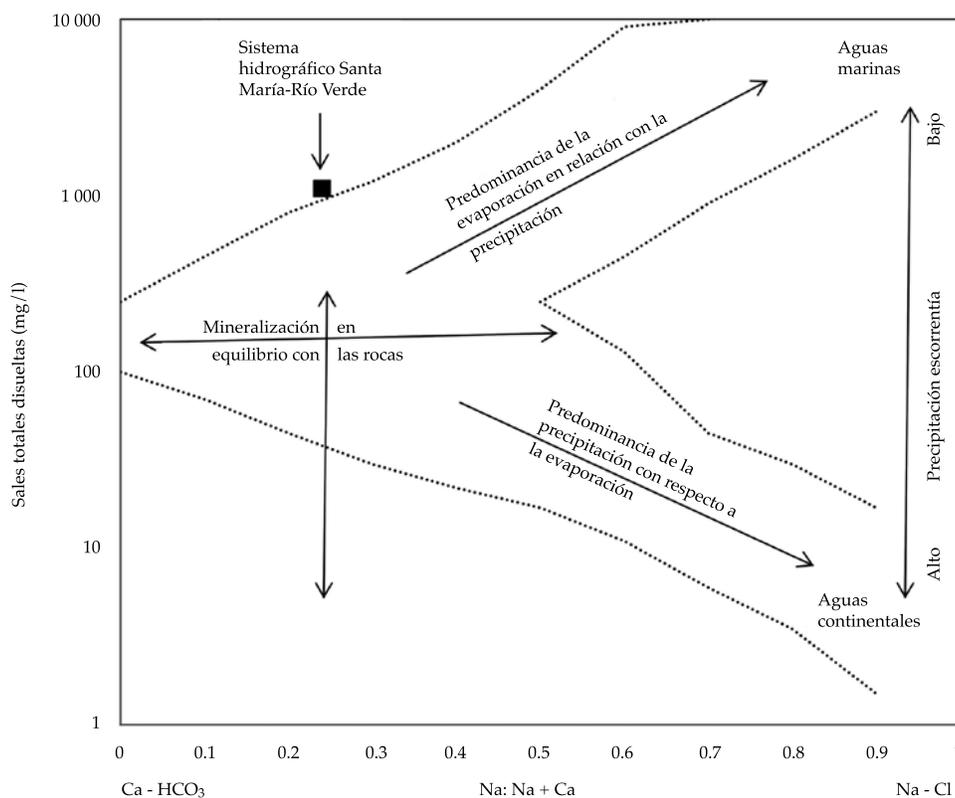


Figura 1. Diagrama de Gibbs del muestreo de aguas del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde.

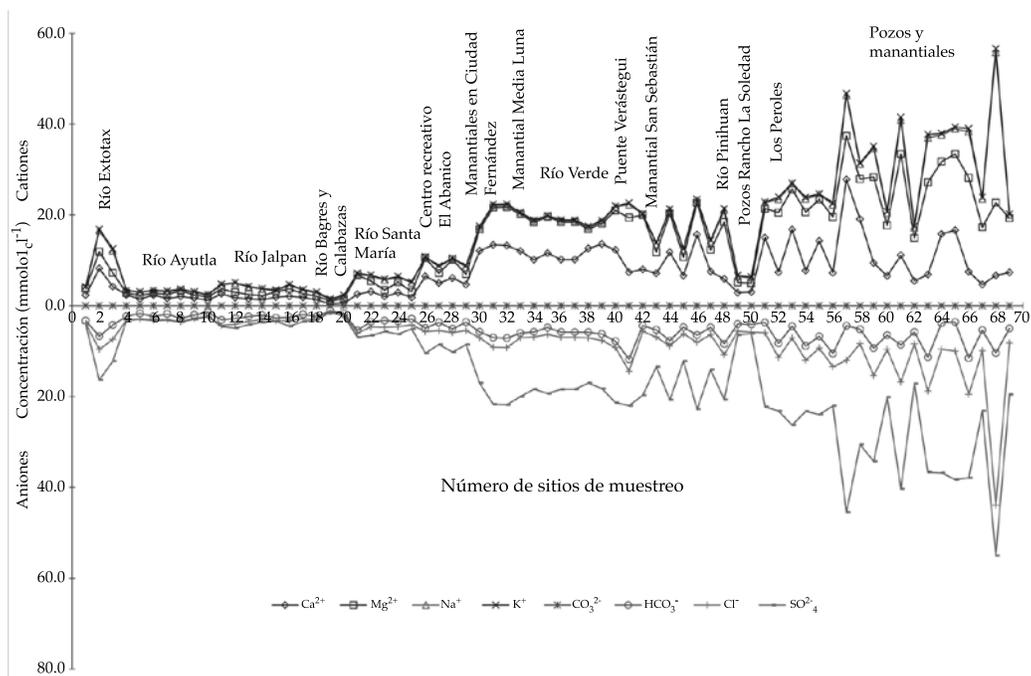


Figura 2. Composición iónica de las aguas del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde, estados de Querétaro y San Luis Potosí.

las formaciones geológicas que atraviesa. Las estaciones 21-25 son del río Santa María, que tiene grandes tramos de caliza; se observa el incremento de la concentración de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . A partir de la estación 52, la salinidad después de los manantiales, en Ciudad Fernández, se incrementa sustancialmente debido a sus formaciones ricas en sales marinas, además de que se encuentra sobre la Plataforma Valles-San Luis.

#### *Salinidad cuantitativa del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde*

En el cuadro 2 se presenta un resumen de los valores de la salinidad cuantitativa medida por medio de conductividad eléctrica, así como la clasificación de acuerdo con Richards (1962), y el porcentaje que representa dentro del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde. Con base en esta información, se elaboró el mapa de distribución espacial de la salinidad cuantitativa de la cuenca, utilizando el método geoestadístico de Kriging (tal como se observa en la figura 3), el cual concuerda con la descripción individual de los componentes del sistema hidrográfico en estudio, comprobando el método.

#### *Salinidad cualitativa del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde*

##### *Salinidad cualitativa relación de adsorción de sodio (RAS)*

Al aumento de la proporción de  $\text{Na}^+$  retenido en el complejo de intercambio del suelo se le conoce como sodificación y es resultado de la utilización de aguas de mala calidad (residuales, salinas, sódicas) (Heidarpour, Mostafazadeh, Abedi, & Malekian, 2007). La concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  varía de manera sensible, como consecuencia de los procesos de precipitación o disolución.

La salinidad sódica se determina a través de la relación de adsorción de sodio (RAS), como se indica en la ecuación (1):

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

El RAS expresa la posibilidad de que el  $\text{Na}^+$  se adsorba en el complejo de intercambio del suelo y la presencia de otros cationes, en espe-

Cuadro 2. Resumen de valores de salinidad cuantitativa del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde.

Sistema hidrográfico	Conductividad eléctrica CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Clasificación	% en el sistema hidrográfico Santa María-Río Verde
Ríos Bagres y Santa María (nacimiento del sistema)	< 250	C1. Baja salinidad	2.9
Ríos Ayutla, Jalpan, Santa María (curso medio)	250-750	C2. Moderada salinidad	33.3
Ríos Extorax, manantiales de plataforma Valles San Luis, Media Luna y Río Verde antes de ingresar a la ciudad (valles agrícolas antes de ingresar a centros urbanos)	750-2 250	C3. Alta salinidad	34.8
Manantiales Ciudad Fernández, Río Verde después de las descargas urbanas, río Baqueros, manantiales Peroles (valles agrícolas después de ingresar a centros urbanos)	> 2 250	C4. Muy altamente salinas	29

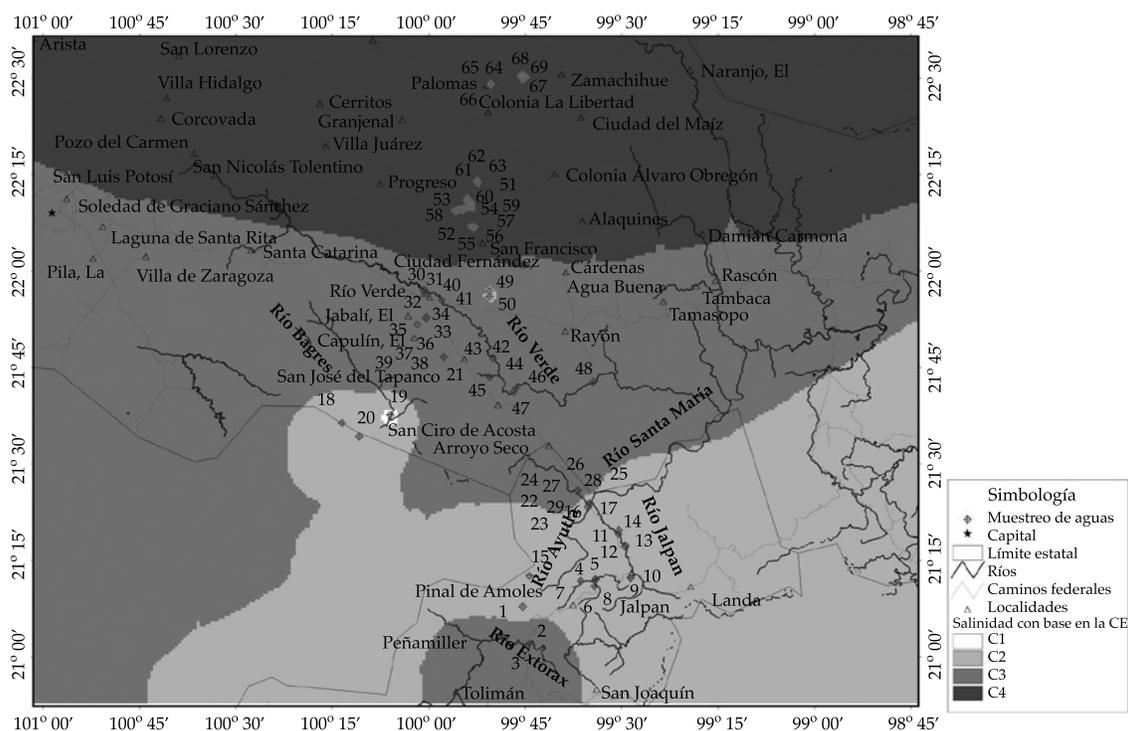


Figura 3. Distribución espacial de la salinidad cuantitativa con base en la conductividad eléctrica de las estaciones de muestreo del sistema hidrográfico

cial el  $\text{Ca}^{2+}$  reduce esta posibilidad (Ortega & Orellana, 2007).

Las formulaciones de RAS que se utilizan con más frecuencia en el manejo de aguas y suelos salinos son RAS y RAS ajustado ( $\text{RAS}_{aj}$ ) (Carrera-Villacrés et al., 2011). El  $\text{RAS}_{aj}$  fue el valor más crítico en el sistema hidrográfico Santa María-Río Verde. El  $\text{RAS}_{aj}$  se calculó a través de la ecuación (2) (Ayers & Westcot, 1987):

$$\text{RAS}_{aj} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} (\text{pH}_{\text{agua}} - \text{pH}_{\text{calculado}}) \quad (2)$$

La ecuación (2) relaciona el Índice de Saturación del Langelier (IS) a través del pH calculado y el IS considera la precipitación del  $\text{CaCO}_3$ .

En función de lo descrito anteriormente, se proyecta que en los ríos Extorax, Ayutla, Jalpan,

Santa María y Río Verde, el  $\text{CaCO}_3$  se precipitará, porque el IS es positivo, y solamente en el río Bagres permanecerá en solución. En otras palabras, la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  disminuirá en 98% de las muestras de agua, sólo por el efecto de la precipitación de la calcita.

El manantial de Media Luna es el principal afluente de Río Verde; éste, antes de pasar por los centros poblados y agrícolas tiene una concentración de  $\text{Na}^+$  de  $0.30 \text{ mmol}_c \text{ l}^{-1}$  y después de que se vierten aguas urbano industriales de las ciudades, el  $\text{Na}^+$  incrementa a  $2.88 \text{ mmol}_c \text{ l}^{-1}$ , es decir, unas 10 veces, por lo que las aguas de esta parte del sistema presentan una salinización sódica.

Se observó el mismo comportamiento, aunque no en la misma magnitud, en la concentración de  $\text{Mg}^{2+}$ . En los inicios de Río Verde, la concentración de este ión fue de  $8.23 \text{ mmol}_c \text{ l}^{-1}$  y después de pasar por los centros urbanos se incrementó a  $12 \text{ mmol}_c \text{ l}^{-1}$ .

En la figura 4 se presenta la distribución espacial de la salinidad con base en el  $RAS_{aj}$  de acuerdo con los límites propuestos en el diagrama de la clasificación de las aguas para riego (Richards, 1962). Los ríos Ayutla, Jalpan, Santa María, Río Verde y Bagres no tienen problemas de sodicidad, pues son cuencas exorreicas; como lo explica Dregne (1976), las sales de  $Na^+$  son las primeras en lixiviarse. El río Extorax tiene una clasificación S2 debido a la descarga de aguas urbano-industriales. Al norte del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde se tienen clasificaciones S3 y S4, pues se trata de cuencas endorreicas, en donde los sistemas hidrográficos no son permanentes, la evaporación excede la precipitación y se acumulan las sales; a eso se añade su pasado marino. Todo esto perjudica a los suelos y cultivos.

Cuando se riega con aguas de RAS elevada no se debe permitir que el suelo se seque

porque se precipitan los bicarbonatos de calcio y magnesio, y posteriormente el yeso; de esta manera, la solución del suelo perderá los cationes alcalinotérreos, con lo que el RAS se elevará y parte del  $Na^+$  tendrá mayor oportunidad de entrar a formar parte del complejo de intercambio. Para evitarlo, los riegos deben ser frecuentes y/o añadir yeso a las aguas (Halliwell, Barlow, & Nash, 2001; Surapanemi & Olsson, 2002).

#### Salinidad cualitativa magnésica en el sistema hidrográfico Santa María-Río Verde

En el sistema hidrográfico en estudio se tienen algunas estaciones del muestreo de aguas donde el catión predominante es el  $Mg^{2+}$  debido al predominio de evaporitas de origen marino, en donde existen dolomitas y calizas. López (1993) explica que la dolomita es un mineral de com-

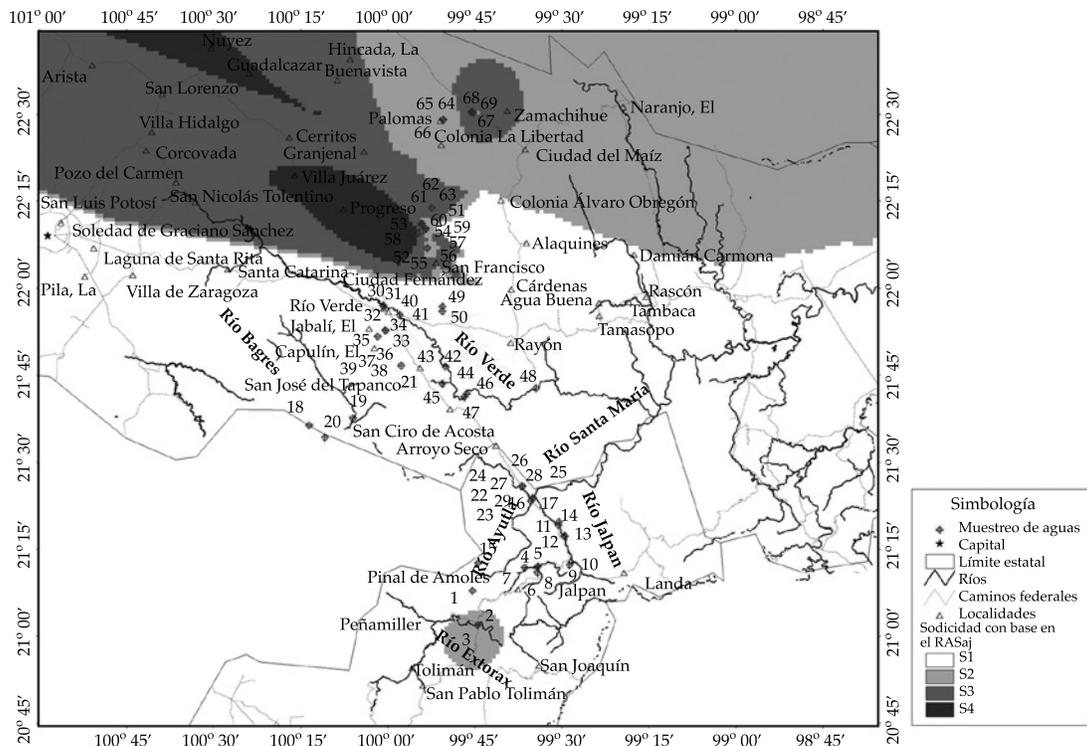


Figura 4. Distribución espacial de la salinidad cualitativa con base en el  $RAS_{aj}$  de las estaciones de muestreo del sistema hidrográfico.

posición de un carbonato doble de magnesio y calcio  $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ , y su roca se denomina dolomía, con más de 25% de  $\text{Mg}^{2+}$ . La mayoría de estas rocas se forma debido al reemplazamiento del  $\text{Ca}^{2+}$  por  $\text{Mg}^{2+}$ ; el reemplazamiento completo implica una contracción de volumen hasta 12.3%, lo que da lugar a la formación de espacios porosos. El anión predominante en el sistema hidrográfico Santa María-Río Verde es el  $\text{SO}_4^{2-}$ ; así, el  $\text{MgSO}_4$  es una sal típica, sobre todo en lugares donde existieron arrecifes coralinos. Szabolcs (1994) cita que el  $\text{MgSO}_4$  tiene una alta solubilidad, es el principal producto de la intemperización, es un componente típico del agua de mar, nunca se acumula en los suelos de forma pura y se encuentra con otras sales fácilmente solubles, como el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  y  $\text{MgCl}_2$ . La solubilidad del  $\text{MgSO}_4$  depende poco de la temperatura, la concentración de saturación de esta sal decrece con un incremento en la concentración del  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Una solución con alta concentración de  $\text{Mg}^{2+}$  es peligrosa para las plantas. El incremento del  $\text{Mg}^{2+}$  en la solución del suelo durante el periodo de acumulación conduce a un aumento en la saturación de  $\text{Mg}^{2+}$  y un incremento en el  $\text{Mg}^{2+}$  absorbido por los minerales del suelo. Szabolcs y Darab (1973) consideran que uno de los criterios cualitativos más importantes es la concentración de  $\text{Mg}^{2+}$  en el agua de riego, calculada por la relación (3):

$$\frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{Ca}^{2+}][\text{Mg}^{2+}]} 100 \quad (3)$$

Alta adsorción de  $\text{Mg}^{2+}$  afecta de manera desfavorable el suelo. Un efecto dañino sobre los suelos aparece cuando la relación anterior supera 50. En la figura 5 se indica la distribución espacial con base en el peligro por  $\text{Mg}^{2+}$  de las estaciones del muestreo de aguas; 30% de los puntos sobrepasa 50% de la relación anterior; son los ríos Bagres, Caracol y Santa María, cerca de San Luis de la Paz, que se encuentran en la Sierra Madre Oriental, donde existió una intensa actividad volcánica en el Cenozoico.

### *Evolución y meteorización geoquímica por evaporación de las aguas del manantial de Media Luna como afectación a los cultivos*

El manantial de Media Luna es el motor económico del municipio de Río Verde y todos los campos agrícolas al sur de su cauce. Esta zona tiene sedimentos fluviales y lacustres que rellenan el valle y constituyen el acuífero de medios granulares. En los límites del valle en Río Verde se tienen sierras y lomeríos formados de calizas, lutitas y rocas volcánicas. Ballín, Cardona y Cisneros (2004) describen que el manantial de Media Luna tiene un caudal de  $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y se utiliza para regar una superficie aproximada de 5 000 ha. Los principales cultivos son frijol, naranja, maíz, tomate, caña de azúcar, maní, alfalfa, calabacita, chile o ají, y tomate.

La tolerancia a la salinidad se expresa como la relación entre el rendimiento de un cultivo a una determinada conductividad eléctrica en relación con su rendimiento en condiciones normales (sin sales). Con este enfoque, Mass y Hoffman (1977) generaron una serie de gráficas que permiten estimar la disminución de los rendimientos causados por las sales y encontraron que el crecimiento vegetativo disminuye linealmente con el aumento de la salinidad por encima de la salinidad umbral (Ayers & Westcot, 1987). La salinidad umbral se define como la salinidad a la que el rendimiento potencial es todavía 100% y se expresa en términos de la conductividad del extracto de saturación. De acuerdo con esta clasificación, los cultivos se concentran en cuatro grupos: tolerantes, moderadamente tolerantes, moderadamente sensibles y sensibles a la salinidad. En el área de estudio, los cultivos como el frijol y la naranja son sensibles a la salinidad; mientras que el maíz, tomate, caña de azúcar, maní, alfalfa, calabacita, chile o ají, y tomate son moderadamente sensibles.

En los valles de cultivo de Río Verde, la mayoría de la irrigación se realiza por superficie; debido a su escasa topografía y el tipo de suelo, el agua no drena con facilidad, acumulándose en forma de pozas y charcas en los campos agrícolas, generándose los fenómenos

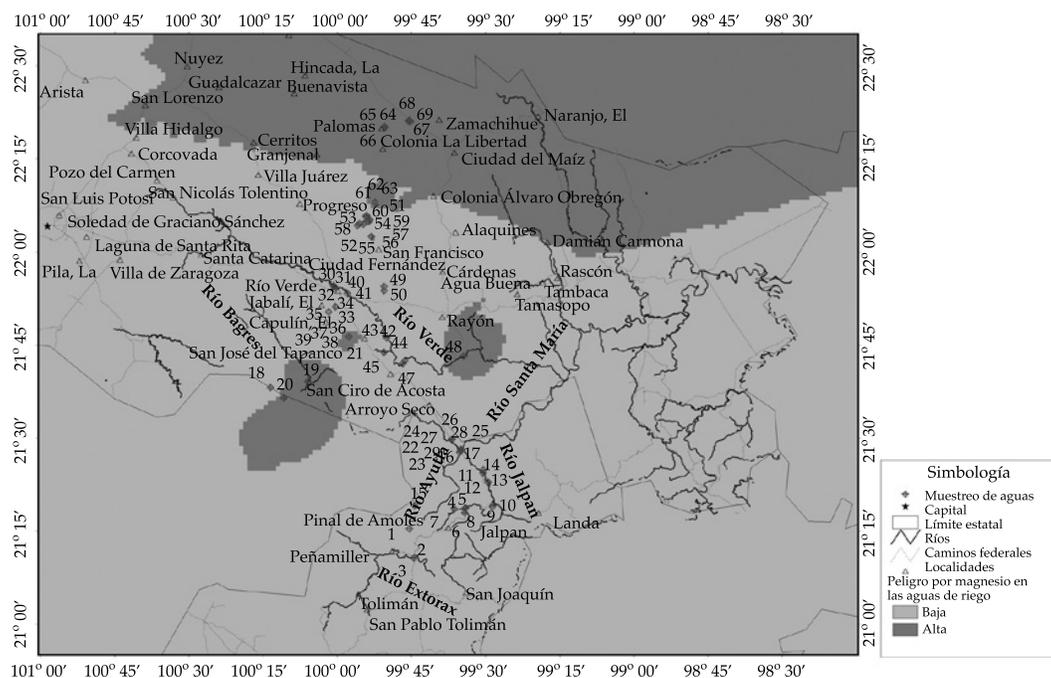


Figura 5. Distribución espacial de la salinidad con base en el peligro por  $Mg^{2+}$  de las estaciones de muestreo del sistema hidrográfico.

de precipitación y evaporación, que marcan la evolución de la salinidad. Por consiguiente, lo que sucede en el campo se trasladó al laboratorio con las aguas de riego del manantial de Media Luna, para determinar la evolución geoquímica por evaporación. Para cumplir este objetivo se siguió el modelo propuesto por Hardie y Eugster (1970), y Risacher y Fritz (2009), y se basó en la noción de alcalinidad (Stumm & Morgan, 1970; Al-Droubi, Fritz, Gac, & Tardi, 1980). Cuando el agua se evapora, los componentes disueltos se concentran y precipitan una secuencia de minerales en el orden de las solubilidades crecientes; debido a la baja solubilidad, el primero en depositarse es la calcita ( $CaCO_3$ ). Durante la precipitación del  $CaCO_3$ , el producto de la actividad iónica se mantiene constante e igual al producto de solubilidad del  $CaCO_3$ . A bajas salinidades, las concentraciones varían como las actividades; el producto de las concentraciones del  $Ca^{2+}$  y del  $CO_3^{2-}$  se mantiene aproximadamente constante. En la figura 6a se presenta la relación entre la

alcalinidad, el  $Ca^{2+}$  y el equilibrio del  $CaCO_3$  del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde. El índice de saturación demuestra que el  $CaCO_3$  se va a precipitar en la zona agrícola de Río Verde, esto es, que va a disminuir el  $Ca^{2+}$ . Después del  $CaCO_3$  precipitan silicatos o  $MgCO_3$ , sales también muy poco solubles. En la vía alcalina, el aumento del pH induce muy a menudo la formación de silicatos. La concentración de la solución del  $CO_3^{2-}$  puede así volverse inferior a la concentración del  $Ca^{2+}$ , lo que desvía la solución de la vía alcalina hacia una vía sulfatada. En caso de precipitación de  $MgCO_3$  (magnesita), el consumo de  $CO_3$  por este mineral también puede permitir que la concentración del  $CO_3$  se vuelva inferior a la del  $Ca^{2+}$  y desviar con ello la solución hacia una vía sulfatada.

En la figura 6b se tiene el cambio de evolución de la vía carbonatada hacia la vía sulfatada por efecto de la precipitación del  $CaCO_3$  del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde; además, se puede observar que la  $MgCO_3$  no se va a precipitar. Si los silicatos y

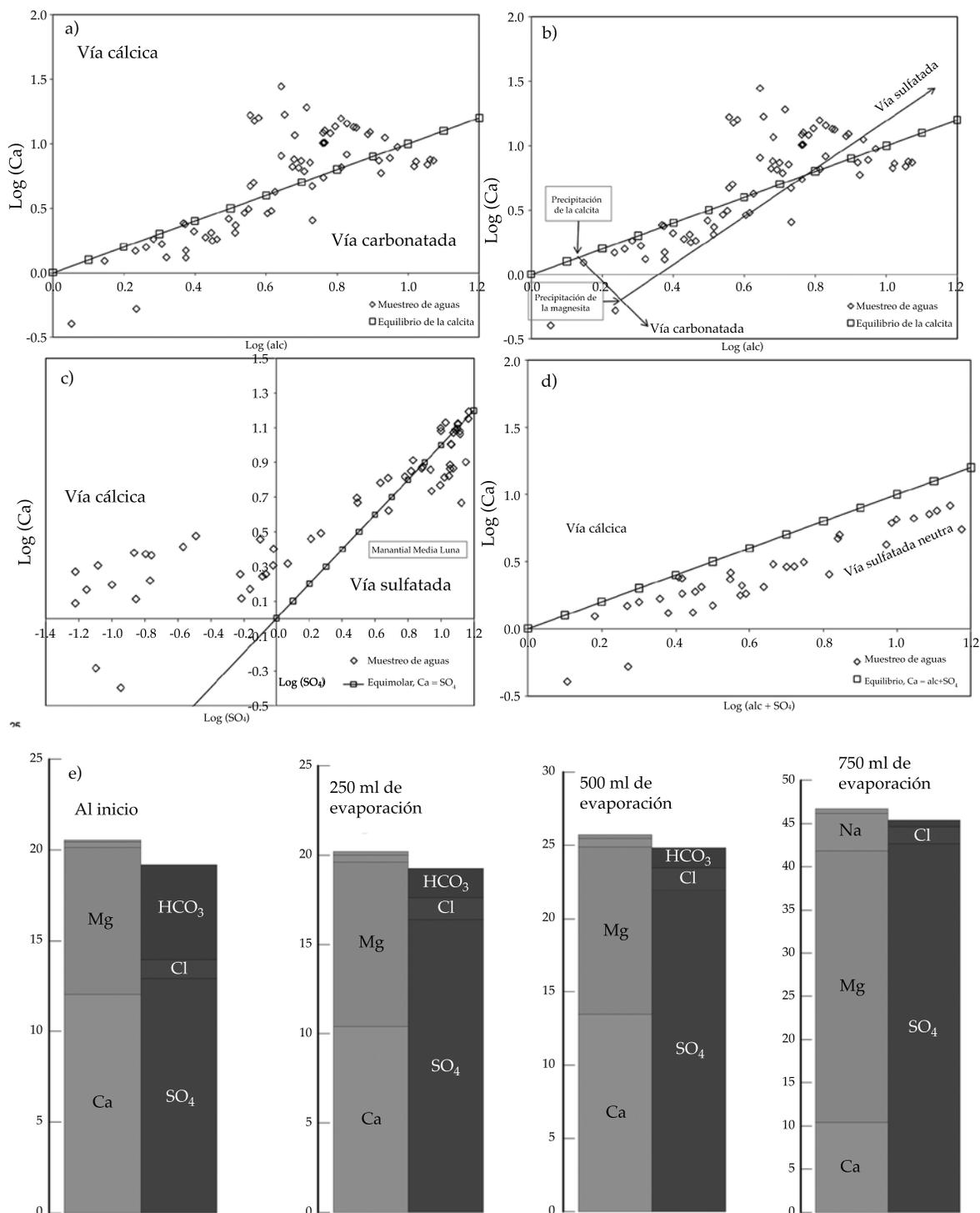


Figura 6. a) Relación entre la alcalinidad y  $\text{Ca}^{2+}$ ; b) cambio de evolución de la vía carbonatada hacia la vía sulfatada; c) relación entre el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ; d) relación entre  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{alc} + \text{SO}_4^{2-}$ ; e) balance de iones del experimento del manantial de Media Luna.

$\text{MgCO}_3$  precipitan, la vía evolutiva no cambia. En la vía neutra, como es el caso del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde, el siguiente mineral en precipitar es el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Aquí también rige el mismo mecanismo que para la calcita. El producto de actividades debe quedar constante e igual al producto de solubilidad del yeso. En soluciones poco salinas, las actividades varían, pues las concentraciones y actividad del agua es ligeramente inferior a 1. En la primera aproximación, el producto de las concentraciones del  $\text{Ca}^{2+}$  y del  $\text{SO}_4^{2-}$  se mantienen constantes. Si al principio de la precipitación del yeso hay más  $\text{SO}_4^{2-}$  que  $\text{Ca}^{2+}$ , entonces la solución se concentrará en  $\text{SO}_4^{2-}$  y se empobrecerá en  $\text{Ca}^{2+}$ , obteniéndose salmueras sulfatadas de tipo general  $\text{Na}/\text{SO}_4\text{-Cl}$ . Por el contrario, si hay más  $\text{Ca}^{2+}$  que  $\text{SO}_4^{2-}$  cuando empieza a precipitar el yeso, es el  $\text{Ca}^{2+}$  el que se concentrará hasta producir salmueras cálcicas de tipo  $\text{Na-Ca}/\text{Cl}$ . Este mecanismo se ilustra en la figura 6c.

Los sistemas hidrográficos Extorax, Ayutla, Jalpan, Santa María, Bagres, Calabazas y pozos 1 y 2 del rancho La Soledad tienen más  $\text{Ca}^{2+}$  que  $\text{SO}_4^{2-}$ , por lo que se van por la vía cálcica. Al empezar la precipitación del yeso, la solución contiene más  $\text{SO}_4^{2-}$  que  $\text{Ca}^{2+}$  y evoluciona hacia la vía sulfatada; esto sucede en el resto de estaciones, sobre todo en las zonas agrícolas de Ciudad Fernández, Río Verde y Ciudad del Maíz; en estas zonas existe una influencia directa de la Plataforma Valles-San Luis. En la figura 6d se observa si las aguas se van por la vía cálcica o sulfatada. En la figura 6e se tienen los diagramas de balances de iones del experimento del manantial de Media Luna. De acuerdo con la teoría de meteorización y evolución de las aguas por evaporación, el sistema hidrográfico Santa María-Río Verde se va por la vía sulfatada neutra; el experimento en el manantial de Media Luna lo confirmó: la magnesita no se precipitará en los campos agrícolas de Río Verde, y el  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , y  $\text{SO}_4^{2-}$  incrementaron de modo considerable su concentración al finalizar la evaporación.

Los resultados de muchos experimentos usando soluciones isosmóticas presentan que el  $\text{NaCl}$  es menos dañino que el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  para el crecimiento en cereales (Steppuhn, Genuchten, & Grieve, 2005). Richards (1962) indica que ello se debe a que el  $\text{SO}_4^{2-}$  altera el balance catiónico óptimo dentro de la planta, pues favorece la absorción del  $\text{Na}^+$  y disminuye la del  $\text{Ca}^{2+}$ . Joshi y Naik (1980) encontraron que la caña de azúcar reduce su área foliar con las sales de  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$  y  $\text{MgSO}_4$ ; sin embargo, la máxima reducción fue debida a  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , mientras que el  $\text{MgCl}_2$  fue el que causó la menor reducción. Por tanto, los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron los más tóxicos, aunque el  $\text{SO}_4^{2-}$  causó mayor daño.

## Conclusiones

Los ríos Bagres y Santa María en el nacimiento, de acuerdo con la salinidad cuantitativa, se clasificaron como C1 de baja salinidad; los ríos Ayutla, Jalpan y Santa María, en el curso medio, se clasificaron como C2 de moderada salinidad; los ríos Extorax, manantiales de plataforma Valles-San Luis, Media Luna y Río Verde, antes de ingresar a los centros urbanos, se clasificaron como C3 de alta salinidad, y estos mismos sistemas hidrográficos, después de pasar por los centros urbanos, se clasificaron como C4, muy altamente salinos. La salinidad cualitativa con respecto a la relación de adsorción de sodio resultó en que no existirán problemas de sodicidad en los suelos por aplicación de las aguas de riego, excepto en las localidades de Progreso, Palomas y Ciudad del Maíz, a pesar de que el Índice Langelier pronosticó que la calcita se precipitará en todos los ríos, excluyendo el río Bagres. La salinidad cualitativa en cuanto a la relación del magnesio fue la más crítica en el sistema hidrográfico Santa María-Río Verde, pues afecta los suelos y cultivos de los valles agrícolas de Río Verde después de que pasa por los centros urbanos, Palomas y Ciudad del Maíz. El experimento de reconcentración de sales corroboró el modelo basado en la alcalinidad, determinando que las aguas inicialmente fueron de sulfatadas cálcicas.

cas —generando condiciones óptimas para los cultivos— a sulfatadas magnésicas y sódicas, provocando condiciones desfavorables para los cultivos. Las aguas del sistema hidrográfico Santa María-Río Verde se localizaron en la zona donde predomina la evaporación con respecto a la precipitación, lo que, al mantenerse la tendencia, provocaría un incremento en la concentración y cambio en la tipología en la salinidad de las aguas y suelos.

## Referencias

- Al-Droubi, A., Frisz, B., Gac, J. Y., & Tardi, Y. (1980). Generalized Residual Alkalinity Concept. Application to Prediction of the Chemical Evolution of Natural Waters by Evaporation. *Am. J. Sci.*, 280, 560-572.
- APHA (1995). *Standard M. D. Methods for the Examination of Water and Waste Water*. 19th ed. Baltimore: American Public Health Association, Port City Press.
- Ayers, R., & Westcot, D. (1987). *La calidad del agua y su uso en la agricultura* (176 pp.). Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1. Traducido al español por J. F. Alfaro de Water Quality and Use in Agriculture. Roma: FAO.
- Ballín, J. R., Cardona, A., & Cisneros, R. (2004). *Evaluación del impacto agrícola sobre el agua subterránea de la zona de Río Verde, S.L.P.* (28 pp.). Folleto técnico. San Luis Potosí, México: Instituto de Investigaciones de Zonas Desérticas de la UASLP.
- Carrera-Villacrés, D., Ortega-Escobar, H., Ramírez-García, J., Ramírez-Ayala, C., Trejo-López, C., & Becerril-Román, A. (abril-junio, 2011). Boro, fosfatos e índices de salinidad del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(2), 5-21.
- Dregne, H. (1976). *Soils of Arid Regions* (238 pp.). Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Figueruelo, J., & Dávila, M. (2004). *Química física del ambiente y de los procesos medioambientales* (592 pp.). Barcelona: Reverté.
- Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms Controlling Word Water Chemistry. *Science*, 170, 1088-1090.
- Grande, R., Hernández, E., Aguilera, N., & Boulaine, J. (1967). Morfología y génesis de los suelos yesíferos de Matehuala, S.L.P. *Agrociencia*, 1(2), 130-146.
- Halliwell, D., Barlow, K., & Nash, D. (2001). A Review of the Effects of Wastewater Sodium on Soil Physical Properties and their Implications for Irrigation Systems. *Aust. J. Soil Res.*, 39, 1259-1267.
- Hardie, L., & Eugster, H. (1970). The Evolution of Closed-basin Brines. *Mineral. Soc. Amer. Spec. Paper*, 3, 273-290.
- Heidarpour, M., Mostafazadeh, B., Abedi, J., & Malekian, R. (2007). The Effects of Treated Wastewater on Soil Chemical Properties Using Subsurface and Surface Irrigation Methods. *Agricultural Water Management*, 90, 87-94.
- Joshi, G. V., & Naik, G. R. (1980). Response of Sugarcane to Different Types of Salt Stress. *Plant and Soil*, 56, 255-263.
- López, E. (1993). *Geología general y de México* (288 pp.). México, DF: Editorial Trillas.
- Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop Salt Tolerance: Reevaluation of Existing Data. *Journal of the Irrigation and Drainage Division of the American Society Engineer*, 103, 115-134.
- Ortega, S. F., & Orellana, G. R. (2007). El riego con aguas de mala calidad en la agricultura urbana. Aspectos a considerar. I. Aguas salinas o alcalinas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(1), 41-44.
- Richards, L. (Ed.) (1962). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos* (172 pp.). México, DF: Editorial Cultura.
- Risacher, F., & Fritz, B. (2009). Origin of Salts and Brine Evolution of Bolivian and Chilean Salars. *Aquat Geochem*, 15, 123-157.
- Shani, U., & Dudley, L. (2001). Field Studies of Crop Response to Water and Salt Stress. *Soil Science Society American Journal*, 65, 1522-1528.
- Steppuhn, H., Genuchten, M., & Grieve, C. (2005). Root-Zone Salinity: I. Selecting a Product-Yield Index and Response Function for Crop Tolerance. *Crop Science*, 45(1), 209-220.
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1970). *Aquatic Chemistry an Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters* (583 pp.). New York: Wiley-Interscience.
- Surapanemi, A., & Olsson, K. A. (2002). Sodification under Conjunctive Water Use in the Shepparton Irrigation Region of Northern Victoria: A Review. *Australia Journal Experimental Agricultural*, 42, 24-263.
- Szabolcs, I. (1994). *Salt-Affected Soils* (274 pp.). Boca Raton, USA: CRC Press, Inc.
- Szabolcs, I., & Darab, K. (1973). An International Source Book , Chapter 7. In *Irrigation/Drainage and Salinity*. Rome: FAO/UNESCO.
- Webster, R., & Oliver, M. (2007). *Geostatistic for Environmental Scientist* (334 pp.) (2nd edition). Barcelona: Ediciones John Wiley and Sons.
- Wetzel, R. (1981). *Limnología* (666 pp.). Barcelona: Ediciones Omega.

## Dirección institucional de los autores

*Dr. David Vinicio Carrera-Villacrés*

Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE  
Av. Gral. Rumiñahui s/n  
Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción  
Sangolquí, ECUADOR  
Teléfono: +59 (3) 3989 400 extensión 1701  
dvcarrera@espe.edu.ec  
david\_carrera@yahoo.com

Programa de Hidrociencias  
Colegio de Postgraduados  
km 36.5 carretera México-Texcoco  
56230 Texcoco, Estado de México, MÉXICO  
villacres@colpos.mx

*M.C. Tania Crisanto-Perrazo*

Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE  
Av. Gral. Rumiñahui s/n  
Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción  
Sangolquí, ECUADOR  
Teléfono: +59 (3) 3989 400 extensión 1701  
ttcrisanto@espe.edu.ec

*Dr. Héctor Ortega-Escobar*  
*M.C. Jazmín Ramírez-García*  
*Dr. Carlos Ramírez-Ayala*

Programa de Hidrociencias  
Colegio de Postgraduados  
km 36.5 carretera México-Texcoco  
56230 Texcoco, Estado de México, MÉXICO  
Teléfono: +52 (15) 8046 800  
manueloe@colpos.mx  
escosia90@hotmail.com  
cara@colpos.mx

*Dr. David Espinosa-Victoria*

Programa de Edafología  
Colegio de Postgraduados  
km 36.5 carretera México-Texcoco  
56230 Texcoco, Estado de México, MÉXICO  
Teléfono: +52 (15) 8046 800  
despinosstar@gmail.com

*Dr. Víctor Ruiz-Vera*

Colegio de Postgraduados  
Campus San Luis Potosí  
Agustín de Iturbide N° 73  
78600 Salinas de Hidalgo, Salinas, S.L.P., MÉXICO  
Teléfono: +52 (496) 9630 240  
vmanuel@colpos.mx

*Dra. Martha Velázquez-Machuca*

Centro Interdisciplinario de Investigación para el  
Desarrollo Integral Regional del Instituto Politécnico  
Nacional, Unidad Michoacán (CIIDIR-IPN-UMICHP)  
Justo Sierra No. 28  
9510 Jiquilpan, Michoacán, MÉXICO  
Teléfono: +52 (353) 5330 083 extensión 82955  
mvelazquezm@ipn.mx

*Dr. Edgar Sánchez-Bernal*

Universidad del Mar, Ciudad Universitaria  
Puerto Ángel, Distrito de San Pedro Pochutla  
70902 Oaxaca, MÉXICO  
Teléfono: +52 (15) 8046 800  
edgarivansb@zicatela.umar.mx