



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN
ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN**

Mario Raúl Pacay García

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, noviembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN
ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MARIO RAÚL PACAY GARCÍA

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR	Ing. Cesar Ariel Villela Nájera
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 25 de noviembre de 2013.



Mario Raúl Pacay García



Guatemala, 25 agosto de 2016

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Dávila
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Luego de un breve saludo, sírvame la presente para informarle que el trabajo de graduación "DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN ACUIFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN", elaborado por el alumno Mario Raúl Pacay García, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular me despido.

Atentamente

Jorge Mario Estrada Asturias
Ingeniero Químico Col. 685
Profesor Titular
Escuela de Ing. Química USAC

Ing. Químico Jorge Mario Estrada Asturias

Colegiado No. 685

Asesor



Guatemala, 05 de octubre de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.056.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **165-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Mario Raúl Pacay García**.
Identificado con número de carné: **2008-15572**.
Previo a optar al título de **INGENIERO AMBIENTAL**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.064.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **MARIO RAÚL PACAY GARCÍA** titulado: **"DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Dav
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala

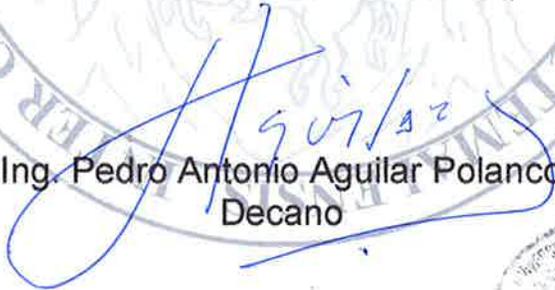


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.538-2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **Mario Raúl Pacay García**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, noviembre de 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Trinidad Santa

Dios Padre, Dios Hijo, Dios Espíritu Santo, por iluminarme en el transcurso de mi carrera, por su misericordia y permitirme llegar a tan esperado día, por los dones, talentos y sabiduría otorgados para lograrlo, gracias Padre.

Mis padres (abuelitos)

Mario Cesar Pacay Cú y Carmen Noemí García de Pacay, por brindarme su apoyo y amor incondicional en cada etapa de mi vida, siendo mi ejemplo de vida e inculcándome valores éticos, morales y espirituales para ser una persona de bien, basado en el respeto y temor a Dios. Más que mis abuelos, mis padres.

Mi madre

Lic. Julia Maribel Pacay García, por su amor incondicional, apoyo moral, económico y espiritual, siendo mi mayor ejemplo de superación y valores morales, éticos y espirituales.

Mis tíos y primo

Yasmina Noemí Pacay García, Edwin Isaías Pacay García, Alicia Concepción Camey y Christopher Alexander Pacay Camey, por haber estado conmigo a lo largo de este camino y ser

para mi más que mis tíos, mis hermanos.

**Licenciado Carlos
Leonel Lemus Siliezar**

Por su apoyo moral y espiritual, sus consejos y motivación académica y deportiva, que me ayudaron a mantenerme por el buen camino, por ser parte de mi familia.

Familia Cacao Pacay

Por estar pendiente de mi persona en el transcurso de mi carrera, por sus consejos y apoyo moral.

Alguien especial para mí

Kiara Odalis Recinos Gómez, por compartir en esta última etapa de nuestra carrera, por tu motivación y apoyo, que Dios te bendiga grandemente.

Mi mejor amigo

Ing. Marvin Mateo Pec Hernández, por ser mi ejemplo de excelencia y superación académica, por tus consejos y apoyo, más que un amigo, mi hermano.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por tener el privilegio de ser un egresado más de esta gloriosa y tricentenaria casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos y bases necesarias para desenvolverme en mi futura vida profesional.
Mis padres (abuelitos)	Mario Cesar Pacay Cú y Carmen Noemí García de Pacay, por su constante motivación y apoyo moral, económico y espiritual.
Mi madre	Licda. Julia Maribel Pacay García, que al igual que mis abuelitos fue mi motivación y apoyo moral, económico y espiritual.
Mi Asesor	Ingeniero Jorge Mario Estrada Asturias, por compartir su conocimiento incondicional y su completo apoyo en el desarrollo de mi trabajo de graduación.
Fam. Alcahe Méndez	Dr. Roberto Alcahe y Sra. María Eugenia Méndez de Alcahe, por valiosa colaboración en el desarrollo de este estudio.

**Mis amigos de la
Facultad**

Denis Eduardo Castañeda, Ivone Urbina, Ethel Errarte, Pablo Andres Lopez, Andres Samayoa, Carlos Alberto Woc, Jose Estuardo Barrios, Fernando Espinoza, Gloria Elizabeth Hernandez, Jaime García Baldizón, Rita Lucía Estrada, Lourdes Mariela Santos, que compartimos cursos, laboratorios y el apoyo durante los mismos.

**Mis amigos, Sección de
Mecánica de
Suelos/Asfaltos CII
USAC**

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez, Ing. Ellios Rodríguez Benítez, Byron Arnaldo García Vielman, Mynor Rene Castillo Samayoa, Moisés Mejía Lorenzo, Julio Cesar Arrollo Morales, Joseph Evarist Moreno, José Juan Istupe Ibáñez, por el apoyo moral, su amistad y su contribución a mi superación académica y profesional.

**Escuela de Ingeniería
Química**

Por la oportunidad que me concedió de poder desarrollar este trabajo de graduación

**Laboratorio Unificado
de Química y
Microbiología Sanitaria
“Dra. Alba Tabarini
Molina”, CII/USAC**

Ing. Xenon Much, por todo el apoyo brindado en el análisis físico químico a las muestras de agua utilizadas en el presente estudio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
HIPÓTESIS.....	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Los acuíferos costeros.....	3
2.2. El fenómeno de la intrusión marina	5
2.3. Proceso de salinización	7
2.4. Tipología básica de los acuíferos costeros.....	7
2.4.1. Kársticos.....	7
2.4.2. Detríticos.....	8
2.5. Deltas iónicos	9
2.6. Dureza del agua	9
2.6.1. Nociones básicas de química	9
2.6.2. Las causas de la dureza	10
2.6.3. Problemas causados por la dureza	12
2.6.4. Ablandamiento.....	13
2.6.5. Sobreablandamiento.....	14
2.6.6. Nombres químicos comunes	15
2.7. Calidad del agua.....	15
2.8. Criterio de calidad.....	16

2.9.	Objetivos de calidad	16
2.10.	Estándares de calidad	17
2.11.	Parámetro de calidad	17
2.12.	Chequeo de los análisis químicos	24
2.13.	Reglas generales para el chequeo de un análisis químico	25
2.14.	Principales relaciones hidroquímicas o iónicas	29
2.15.	Clasificaciones hidroquímicas	29
2.15.1.	Clasificación de Alekin modificado	30
2.15.2.	Clasificación de Palmer	31
2.15.3.	La clasificación de Shoeller	34
2.16.	Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos	34
2.16.1.	Digrama de Stiff	35
2.16.2.	Diagrama de Piper:	37
2.16.3.	Schoeller- Barkalof	46
2.16.4.	Utilidad del diagrama de Schoeller- Barkalof.....	49
2.16.5.	Diagrama de Gibbs (boomerang)	49
2.16.6.	Diagramas binarios	51
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	53
3.1.	Variables	53
3.1.1.	Variables independientes	53
3.1.2.	Variables dependientes	53
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	55
3.2.1.	Área de investigación	55
3.2.2.	Campo de investigación	55
3.2.3.	Línea de investigación.....	55
3.3.	Ubicación	56
3.3.1.	Vertiente del Pacífico	56
3.4.	Recursos humanos disponibles	58

3.5.	Recursos materiales disponibles	59
3.6.	Técnica cualitativa o cuantitativa	59
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información	59
3.8.	Tabulación Ordenamiento de la Información	60
3.8.1.	Procedimiento.....	60
3.8.2.	Recolección de muestras y análisis de laboratorio.....	62
3.9.	Plan de análisis de los resultados	66
3.9.1.	Programas para el análisis de datos.....	66
3.10.	Análisis estadístico para la determinación de puntos de muestreo.....	66
3.10.1.	La distribución t.....	66
3.10.2.	Determinación del tamaño de la muestra para estimar las medidas.....	69
3.10.3.	Determinación de la cantidad de estaciones (puntos) de muestreo.....	71
4.	RESULTADOS	73
4.1.	Establecimiento de puntos de control georeferenciados	73
4.1.1.	Ubicación y Coordenadas de estaciones.....	74
4.2.	Toma de muestras para laboratorio.....	90
4.2.1.	Descripción de la toma de muestras.....	90
4.2.2.	Volumen	90
4.2.3.	Cerrado.....	91
4.2.4.	Rotulación.....	91
4.2.5.	Otros datos	91
4.3.	Análisis hidroquímico, época seca, época húmeda.....	92
4.3.1.	Parámetro en mg/l	92
4.3.2.	Parámetros en términos de meq/l.....	98
4.3.3.	Parámetros en términos de %meq/l.....	104

4.3.4.	Conversión de mg/l a meq/l.....	110
4.3.4.1.	Primera fase de muestreos	110
4.3.5.	Concentraciones en % meq/l para distintas etapas de muestreo.....	111
4.4.	Variación de % de concentración de iones según puntos de control	112
4.4.1.	Estación seca.....	112
4.4.2.	Estación húmeda.....	118
4.5.	Diagrama de Piper, establecimiento de fenómeno de intrusión marina.....	124
4.5.1.	Concentraciones en %meq/l para diagrama de Piper estación seca	124
4.5.2.	Concentraciones en %meq/l para diagrama de Piper estación húmeda.....	140
5.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	157
5.1.	Análisis del fenómeno de intrusión marina con base en diagramas de Piper y casos típicos de agua según método utilizado	157
5.1.1.	Comportamiento del contenido iónico del agua, época seca.....	157
5.1.2.	Comportamiento del contenido iónico del agua, época húmeda.....	158
5.2.	Comportamiento del fenómeno de intrusión marina con base en la época del año analizada	162
5.2.1.	Desplazamiento de interfase aproximada con base a los puntos de control y época de muestreo	162
5.2.1.1.	Época seca.....	163
5.2.1.2.	Época húmeda	163

5.3.	Análisis de la incidencia del contenido iónico del agua según puntos de control para uso y explotación.....	166
5.4.	Análisis de la variación de las distancias entre cada estación (punto) de muestreo	168
CONCLUSIONES		171
RECOMENDACIONES		173
BIBLIOGRAFÍA.....		175
APÉNDICES		177
ANEXOS		211

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Equilibrio agua dulce-agua salada	5
2.	Cono de intrusión producido por bombeo	6
3.	Acuífero kárstico costero	8
4.	Acuífero detrítico	8
5.	Deltas iónicos	9
6.	Diagrama de Stiff típicos	36
7.	Distribución del diagrama de Stiff	37
8.	Esquema del diagrama de Piper	38
9.	Datos para el diagrama de Piper	39
10.	% de aniones y cationes para el diagrama de Piper	40
11.	Concentración en % para Piper	41
12.	Localización de aniones y cationes	43
13.	Proyección de los puntos de aniones y cationes	44
14.	Casos típicos de agua	45
15.	Peso de un meq de cada parámetro	47
16.	Datos diagrama de Schoeller	47
17.	Gráfico de una muestra de agua en Schoeller	48
18.	Diagrama de Gibbs	50
19.	Diagramas binarios	52
20.	Vertiente del Pacífico	56
21.	Cuenca del río Suchiate	57
22.	Coordenadas ejemplo de estación de toma de muestras	58
23.	Estación de muestreo núm. 1	74

24.	Mapa, estación de muestreo núm. 1	75
25.	Estación de muestreo núm. 2	76
26.	Mapa, estación de muestreo núm.2.....	77
27.	Estación de muestreo núm. 3	78
28.	Mapa, estación de muestreo núm. 3.....	79
29.	Estación de muestreo núm. 4	80
30.	Mapa, estación de muestreo núm. 4.....	81
31.	Estación de Muestreo núm. 5	82
32.	Mapa, estación de muestreo núm. 5.....	83
33.	Estación de muestreo núm. 6	84
34.	Mapa, estación de muestreo núm. 6.....	85
35.	Estación de muestreo núm. 7	86
36.	Mapa, estación de muestreo núm. 7.....	87
37.	Estación de muestreo núm. 8	88
38.	Mapa, estación de muestreo núm. 8.....	89
39.	Estación seca, calcio	112
40.	Estación seca, magnesio	113
41.	Estación seca, sodio y potasio.....	114
42.	Estación seca, bicarbonatos	115
43.	Estación seca, cloruros.....	116
44.	Estación seca, sulfatos	117
45.	Estación húmeda, calcio	118
46.	Estación húmeda, magnesio.....	119
47.	Estación húmeda, sodio y potasio	120
48.	Estación húmeda, bicarbonatos.....	121
49.	Estación húmeda, cloruros	122
50.	Estación húmeda, sulfatos.....	123
51.	Estación núm. 1 Época de muestreo: seca.....	125
52.	Estación núm. 2 Época de muestreo: seca.....	127

53.	Estación núm. 3 Época de muestreo: seca	129
54.	Estación núm. 4 Época de muestreo: seca	131
55.	Estación núm. 5 Época de muestreo: seca	133
56.	Estación núm. 6 Época de muestreo: seca	135
57.	Estación núm. 7 Época de muestreo: seca	137
58.	Estación núm. 8 Época de muestreo: seca	139
59.	Estación núm. 1 Época de muestreo: húmeda.....	141
60.	Estación núm. 2 Época de muestreo: húmeda.....	143
61.	Estación núm. 3 Época de muestreo: húmeda.....	145
62.	Estación núm. 4 Época de muestreo: húmeda.....	147
63.	Estación núm. 5 Época de muestreo: húmeda.....	149
64.	Estación núm. 6 Época de muestreo: húmeda.....	151
65.	Estación núm. 7 Época de muestreo: húmeda.....	153
66.	Estación núm. 8 Época de muestreo: húmeda.....	155
67.	Rombo de clasificación de diagrama de Piper, época seca.	160
68.	Rombo de clasificación, diagrama de Piper época húmeda.....	161
69.	Línea de interfase aproximada para época seca	164
70.	Línea de interfase aproximada para época húmeda	165
71.	Actividad principal, estaciones 1 y 2: Pesca artesanal	166
72.	Material transportado de canto rodado.....	167
73.	Uso del agua para riego en plantaciones	168
74.	Mapa general, estaciones de muestreo	169

TABLAS

I.	Clasificación de la dureza del agua.....	12
II.	Parámetros físicos.....	18
III.	Parámetros orgánicos	18
IV.	Gases.....	19

V.	Parámetros inorgánicos	20
VI.	Metales pesados.....	21
VII.	Indicadores de riesgo de enfermedades gastrointestinales	22
VIII.	Organismos patógenos.....	22
IX.	Virus.....	23
X.	Otros parámetros microbiológicos	24
XI.	Factores de conductividad	25
XII.	Ejemplo, chequeo de un análisis químico.....	26
XIII.	Clasificación según Palmer.....	33
XIV.	Tabla análisis de variables.....	54
XV.	Parámetros en mg/l, por cada estación	63
XVI.	Parámetros en meq/l, por cada estación	64
XVII.	Parámetros en %, por cada estación	65
XVIII.	Percentiles de la distribución t	68
XIX.	Estación 1	74
XX.	Estación 2	76
XXI.	Estación 3.....	78
XXII.	Estación 4	80
XXIII.	Estación 5.....	82
XXIV.	Estación 6	84
XXV.	Estación 7	86
XXVI.	Estación 8	88
XXVII.	Parámetros en mg/l, primer muestreo época seca	92
XXVIII.	Parámetros en mg/l, segundo muestreo época seca.....	93
XXIX.	Parámetros en mg/l, tercer muestreo época seca	94
XXX.	Parámetros en mg/l, primer muestreo época húmeda.....	95
XXXI.	Parámetros en mg/l, segundo muestreo época húmeda	96
XXXII.	Parámetros en mg/l, tercer muestreo época húmeda.....	97
XXXIII.	Parámetros en meq/l, primer muestreo época seca	98

XXXIV. Parámetros en meq/l, segundo muestreo época seca	99
XXXV. Parámetros en meq/l, tercer muestreo época seca.....	100
XXXVI. Parámetros en meq/l, primer muestreo época húmeda.....	101
XXXVII. Parámetros en meq/l, segundo muestreo época húmeda.....	102
XXXVIII. Parámetros en meq/l, tercer muestreo época húmeda	103
XXXIX. Parámetros en %meq/l, primer muestreo época seca.....	104
XL. Parámetros en %meq/l, segundo muestreo época seca	105
XLI. Parámetros en %meq/l, tercer muestreo época seca	106
XLII. Parámetros en %meq/l, primer muestreo época húmeda	107
XLIII. Parámetros en %meq/l, segundo muestreo época húmeda.....	108
XLIV. Parámetros en %meq/l, tercer muestreo época húmeda	109
XLV. Estación núm. 1 Cationes, mg/l-meq/l.....	110
XLVI. Estación núm. 1 aniones, meq/l-%meq/l	111
XLVII. Estación seca parámetro: calcio	112
XLVIII. Estación seca parámetro: magnesio	113
XLIX. Estación seca parámetro: sodio y potasio.....	114
L. Estación seca parámetro: bicarbonatos	115
LI. Estación seca parámetro: cloruros	116
LII. Estación seca parámetro: sulfatos	117
LIII. Estación húmeda parámetro: calcio	118
LIV. Estación húmeda parámetro: magnesio.....	119
LV. Estación húmeda parámetro: sodio y potasio	120
LVI. Estación húmeda parámetro: bicarbonatos.....	121
LVII. Estación húmeda parámetro: cloruros.....	122
LVIII. Estación húmeda parámetro: sulfatos	123
LIX. Estación núm. 1 Época de muestreo: seca	124
LX. Estación núm. 2 Época de muestreo: seca	126
LXI. Estación núm. 3 Época de muestreo: seca	128
LXII. Estación núm. 4 Época de muestreo: seca	130

LXIII.	Estación núm. 5 Época de muestreo: seca.....	132
LXIV.	Estación núm. 6 Época de muestreo: seca.....	134
LXV.	Estación núm. 7 Época de muestreo: seca.....	136
LXVI.	Estación núm. 8 Época de muestreo: seca.....	138
LXVII.	Estación núm. 1 Época de muestreo: húmeda	140
LXVIII.	Estación núm. 2 Época de muestreo: húmeda	142
LXIX.	Estación núm. 3 Época de muestreo: húmeda	144
LXX.	Estación núm. 4 Época de muestreo: húmeda	146
LXXI.	Estación núm. 5 Época de muestreo: húmeda	148
LXXII.	Estación núm. 6 Época de muestreo: húmeda	150
LXXIII.	Estación núm. 7 Época de muestreo: húmeda	152
LXXIV.	Estación núm. 8 Época de muestreo: húmeda	154

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Ca⁺	Calcio
Cl⁻	Cloro
HCO₃⁻	Bicarbonatos
K⁺	Potasio
meq/l	Miliequivalente litro
%meq/l	Porcentaje de miliequivalente litro
Mg⁺²	Magnesio
mg/l	Miligramo litro
Na⁺	Potasio
SO₄⁻²	Sulfatos

GLOSARIO

Anión	Un anión es un ion con carga eléctrica negativa que ha ganado electrones.
Acuífero	Es el estrato o formación geológica permeable que permite la circulación y el almacenamiento del agua subterránea por sus poros o grietas.
Acuífero detrítico	Están constituidos principalmente por capas alternantes de gravas, arenas, limos y arcillas, con diferente geometría y continuidad espacial.
Acuífero kárstico	El agua se encuentra ubicada sobre fisuras o diaclasas, también intercomunicadas entre sí, su distribución hace que los flujos internos de agua se comporten de una manera heterogénea, por direcciones preferenciales.
Agua salobre	Se llama agua salobre al agua que tiene más sal disuelta que el agua normal de ríos y lagos, pero menos que el agua de los océanos.
Catión	Un catión es un ión con carga eléctrica positiva, es decir, que ha perdido electrones. Los cationes se describen con un estado de oxidación positivo

Cuenca hidrográfica	Una cuenca hidrográfica es un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que drena sus aguas al mar a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorreico. Es delimitada por la línea divisoria de aguas (parte aguas).
Cuerpo de agua	Es una masa o extensión de agua, tal como un lago, mar u océano que cubre parte de la Tierra.
Delta aluvial	Un abanico aluvial, delta o cono de deyección, es en geomorfología una forma del terreno o accidente geográfico formado cuando una corriente de agua que fluye rápidamente entra en una zona más tendida y su velocidad disminuye, extendiéndose su cauce en abanico.
Dureza del agua	La dureza del agua se define como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes y se expresa en equivalente de carbonato de calcio y constituye un parámetro muy significativo en la calidad del agua.
Georeferenciación	Técnica de posicionamiento espacial de una entidad en una localización geográfica única y bien definida en un sistema de coordenadas y datum específicos.

Hidráulica	Estudia las propiedades mecánicas de los líquidos dependiendo de las fuerzas a las que son sometidos.
Hidrogeología	Es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas).
Hidroquímica	Rama de la Hidrogeología que estudia la química de las aguas subterráneas, aunque también es aplicable para las aguas superficiales.
Intrusión salina	La intrusión salina es el proceso por el cual los acuíferos costeros están conectados con el agua del mar.
Ión	Es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutro.
Llanura costera	Llanura costera o llanura litoral es la denominación geomorfológica de una llanura o planicie de baja altitud que se dispone junto a un mar (incluyendo los mares interiores). Usualmente la llanura costera se prolonga bajo el mar en lo que se conoce como plataforma continental.

Nivel piezométrico	Se ha definido el concepto de nivel piezométrico como la altura de la superficie libre de agua sobre el nivel del mar, en los acuíferos libres. En los confinados, es la altura que alcanzaría el agua en el interior de un sondeo hasta equilibrarse con la presión atmosférica.
Recarga hídrica	La zona de recarga (o área de recarga) es la parte de la cuenca hidrográfica en la cual, por las condiciones climatológicas, geológicas y topográficas, una gran parte de las precipitaciones se infiltran en el suelo, llegando a recargar los acuíferos en las partes más bajas de la cuenca.
Río	Una corriente natural de agua que fluye con continuidad. Posee un caudal determinado, rara vez es constante a lo largo del año, y desemboca en el mar, en un lago o en otro río, en cuyo caso se denomina afluente.
Roca carbonatada	Las rocas carbonatadas son un tipo de rocas sedimentarias compuestas, principalmente, por minerales de carbonato cálcico (CaCO_3) o de otros carbonatos.
Sarro	El carbonato de calcio es un compuesto químico, de fórmula CaCO_3 . Cotidianamente es conocido como sarro.

Sedimentos	El sedimento es un material sólido acumulado sobre la superficie terrestre (litósfera) derivado de las acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera.
Till glacial	Son pilas de sedimentos variados de origen glaciar. A veces se denomina drift o arrastre glaciar al conjunto de sedimentos heterogéneos de origen glaciar. El till glaciar es aquella parte del drift glaciar que fue depositado directamente por el glaciar. Puede variar en su constitución desde arcillas hasta mezclas de arcilla, arena, grava y canto rodado.
UTM	El sistema de coordenadas universal transversal de Mercator (en inglés <i>Universal Transverse Mercator</i>) es un sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de <i>Mercator</i> , que se construye como la proyección de <i>Mercator</i> normal, pero en vez de hacerla tangente al Ecuador, se la hace secante a un meridiano.
Vertiente hidrográfica	Es un conjunto de cuencas hidrográficas cuyos ríos con sus afluentes desembocan en un mismo mar y en ocasiones, en un mismo lago, especialmente, si es de superficie considerable.

RESUMEN

En el presente estudio, se llevó a cabo el análisis y determinación del frente de intrusión marina en un acuífero costero. Se basó en el análisis de un cuerpo de agua, que para fines de esta investigación se trató del Río Suchiate en el Municipio de Ocosingo del departamento de San Marcos. En él se establecieron los parámetros de calidad del agua en relación con el contenido de aniones y cationes. Así mismo, se determinó la zona de interfase en donde se mezcla agua dulce con agua salada.

Se realizó la toma de muestras en diferentes estaciones de monitoreo a partir del delta del río, con base a georeferenciación. Se determinó el avance de la calidad del agua en los diferentes puntos de muestreo. En el análisis hidroquímico, se hizo uso del Diagrama de Piper, para conocer los porcentajes de las concentraciones de los diferentes aniones y cationes, que se determinaron por medio de análisis de laboratorio. Además, se clasificaron los tipos de agua según la región en la que hayan quedado graficados los puntos.

Se determinó el número de análisis para cada ion, para obtener un promedio de datos significativos y visualizar mejor la evolución por cada punto georeferenciado. Los muestreos en las épocas seco-lluviosa en la vertiente del pacífico de Guatemala.

Se concluyó en la clasificación de los tipos de agua y los motivos de variación en su contenido de salinidad, sedimentos, oxidación de sulfatos, intercambio iónico, rocas cristalinas o carbonatadas.

OBJETIVOS

General

Determinar, espacialmente por método hidroquímico en el de laboratorio y campo, el frente de intrusión marina en un acuífero costero para conocer el uso potencial de explotación del cuerpo de agua.

Específicos

1. Establecer los niveles de concentración de los aniones y cationes, sodios, potasio, magnesio, calcio, sulfatos, bicarbonatos y cloruros contenidos en las muestras de agua obtenidas en cada estación de muestreo (mg/l).
2. Graficar, por medio del Diagrama de Piper, las proporciones de las concentraciones obtenidas.
3. Determinar la evolución iónica del agua marina en función del avance de la intrusión en cada estación georeferenciada, por cada época de muestreo.
4. Realizar un análisis comparativo de los casos típicos de agua, según la clasificación para el Diagrama de Piper.

5. Formular recomendaciones relacionadas con los usos potenciales de explotación que el agua del río Suchiate, según parámetros de calidad del agua.

HIPÓTESIS

Hipótesis de trabajo

Existe variación entre la concentración de aniones y cationes entre cada punto de muestreo y una diferencia en el fenómeno de intrusión marina, según la época o estación de muestreo.

Hipótesis nula (H_{01})

No existe variación en la concentración de aniones y cationes entre cada punto de muestreo a lo largo del cuerpo de agua a evaluar.

Hipótesis alternativa (H_{i1})

Existe variación en la concentración de aniones y cationes entre cada punto de muestreo a lo largo del cuerpo de agua a evaluar.

Hipótesis nula (H_{02})

No existe diferencia en el fenómeno de intrusión marina según época o estación de muestreo evaluada.

Hipótesis alternativa (H_{i2})

Existe diferencia en el fenómeno de intrusión marina según época o estación de muestreo evaluada.

INTRODUCCIÓN

Se llevó a cabo la determinación espacial del frente de intrusión marina en un acuífero costero. Se determinó la calidad del agua para su uso y explotación. Es claro que la intrusión salina es un proceso natural que ocurre en las costas, donde el agua de mar penetra tierra adentro en los acuíferos costeros en proporción a la inter relación de diversos factores. Estos incluyen la porosidad de las rocas y los suelos en la costa, el espesor de la capa de agua dulce en los acuíferos costeros, las mareas y la extracción de agua fresca mediante pozos.

En zonas donde las rocas en la costa son de origen volcánico de baja porosidad y pocas fracturas o suelos finos consolidados impermeables, el agua del mar no penetra tierra adentro. En costas donde los acuíferos son formados por rocas porosas como las calizas o mezclas de arena y grava (aluvión), el agua de mar penetra tierra adentro en proporción al espesor de la capa de agua fresca cerca del mar.

En acuíferos costeros donde no se extrae agua subterránea en exceso a la que se infiltra o recarga a los acuíferos, la zona de interface de agua salobre se mantiene en un equilibrio controlado por las mareas y la porosidad de las rocas. La línea de interfase de agua salina también penetra tierra adentro por el cauce de los ríos en valles costeros cuando la pendiente del fondo del cauce es mínima y la boca del río está abierta al mar (2). El uso potencial del agua, varía según el tipo de concentración de la cual está conformada. En las cercanías del cuerpo de agua del río Suchiate, en el municipio de Ocosingo, del departamento

de San Marcos, el agua se usa para riegos, y consumo doméstico, la cual se obtiene por medio del manto freático (pozos).

Es preciso conocer la variación del contenido de aniones y cationes en el agua que la población utiliza, porque puede incidir en los cultivos para los cuales tiene vocación el suelo del lugar, con el uso del agua del acuífero que conforma esa misma región.

Los análisis y muestreos se realizaron en época seca que comprende de noviembre a abril y época lluviosa que comprende de mayo a octubre. Con ello, se determinó la incidencia que estas tuvieron en su línea de interfase para diferente época del año. De esta forma, en época seca o de baja recarga hídrica por ausencia de lluvia, existió un avance en relación a la intrusión salina y, en época lluviosa, se determinó una alta recarga hídrica, el agua salada se aleja hacia la costa.

La importancia de este estudio de monitoreo, permitió evaluar en forma cuantitativa, cada parámetro de aniones y cationes y establecer la presencia de sodio, potasio, magnesio, calcio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, al fijar estaciones de control. Para cada etapa de muestreo, se determinó el contenido de los mismos en cada época. Se graficaron con la ayuda del Diagrama de Piper, que clasificó los tipos de agua que se obtuvieron y se concluyó con base a los resultados de los análisis de cada muestra.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala, aún se carece de estudios que describan el análisis del frente de intrusión marina en los acuíferos costeros. Sin embargo, en otros países, como España, se han llevado a cabo estudios de esta naturaleza, según los autores Custodio y Llamas, en el año 1983. Estos estudios se realizaron en la provincia de Castellón al Este de España. Así mismo, estudios sobre la salinización del agua en un acuífero costero en la zona árida del Noreste de México entre los años de 1970 a 1990. Contribución al conocimiento hidrogeoquímico de acuíferos cársicos costeros con intrusión marina. Sector Güira-Quivicán, Cuenca Sur de La Habana, realizado por M.Sc. Patricia González Hernández, en el año 2003. Para el Río Suchiate, aún no se cuenta con un análisis hidroquímico que pueda determinar este fenómeno en función a su contenido iónico.

En el río Suchiate, los últimos 75 km marcan la frontera entre México y Guatemala, nace a una altitud de 3 000 msnm en las faldas del volcán Tacaná en el departamento de San Marcos y discurre en dirección sur-suroeste hasta desembocar en el océano Pacífico.

La cuenca del río Suchiate tiene una superficie de 1 064 km², en territorio guatemalteco y 336 km² en territorio mexicano. Los puentes que cruzan el Suchiate son el puente internacional de Talismán, entre las ciudades de Talismán y El Carmen, y el puente Dr. Rodolfo Robles, entre Ciudad Hidalgo y Ciudad Tecún Umán (municipio de Ayutla).

Los ríos que corresponden a la Vertiente del Pacífico, tienen longitudes cortas (110 km. promedio) y se originan a una altura media de 3 000 msnm. Las pendientes son fuertes en las partes altas de las cuencas, entre el 10 % y el 20 % cambiando bruscamente a pendientes mínimas en la planicie costera, lo que crea grandes zonas susceptibles a las inundaciones. Estas condiciones fisiográficas producen crecidas instantáneas de gran magnitud y corta duración, así como tiempos de propagación muy cortos.

Por otro lado, todos los ríos de la vertiente del Pacífico acarrear grandes volúmenes de material, especialmente escorias y cenizas volcánicas. La cadena volcánica se encuentra entre los límites de la vertiente y debido a este arrastre de material, los ríos tienen cursos inestables que causan daños e inundaciones en la planicie costera. La precipitación en la vertiente del Pacífico tiene períodos de gran intensidad, típica de las zonas costeras con una precipitación media anual de 2 200 mm.

En el proceso de intrusión salina (sea natural o inducida), la zona de interface de agua salina penetra tierra adentro por debajo de la capa de agua fresca (dulce). Esta intrusión salina resulta en tres capas de agua en el acuífero, donde el manto freático es formado por una capa de agua fresca en proporción al flujo hidráulico en la zona. En el fondo del acuífero se desplaza una capa de agua salina, con concentraciones de sólidos disueltos que excede 5 000 miligramos por litro (mg/L). Entre las capas de agua fresca y salina ocurre una zona de transición o difusión (interface), lo que varía la salinidad verticalmente desde valores representativos de agua fresca hasta concentraciones de agua salina.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Los acuíferos costeros

De forma sencilla, se puede definir un acuífero costero como aquella formación geológica capaz de almacenar agua y transmitirla, es decir que puede moverse a través del mismo, pero con la característica particular de que está conectado hidráulicamente con el mar. Generalmente, alguno de sus límites puede estar a su vez relacionado hidráulicamente con otros acuíferos del interior.

De esta forma se pueden considerar como el último eslabón en el ciclo natural del agua, en su variante subterránea, que reciben agua de otros acuíferos, de aguas superficiales o de lluvia directamente, para devolverla finalmente al mar.

Se considera que en la naturaleza de estas formaciones puede hacerse una primera clasificación básica de acuíferos costeros en dos tipos principales: detríticos y carbonatados. Hay otro tipo de acuífero menos frecuente, constituido por plataformas volcánicas, consistentes en rocas efusivas porosas y permeables con una morfología sensiblemente llana.

Entre los acuíferos detríticos costeros podemos distinguir, según el autor Custodio, atendiendo a su morfología, los siguientes: deltas, aluviales costeros, llanuras costeras y piedemontes costeros. Todos ellos están constituidos principalmente por capas alternantes de gravas, arenas, limos y arcillas, con diferente geometría y continuidad espacial.

Un modelo hidrogeológico habitual en los deltas y aluviales costeros consiste en la posibilidad de distinción de dos conjuntos acuíferos, uno superior libre y otro inferior confinado, separados por un paquete arcilloso de media o baja permeabilidad. El espesor de esta capa arcillosa normalmente disminuye hacia los bordes de la cubierta que llega a desaparecer, lo que origina el contacto entre ambas formaciones acuíferas.

Por su parte, las llanuras detríticas costeras suelen dar lugar a acuíferos multicapa, libres semiconfinados que yacen, bien sobre materiales de baja permeabilidad que aíslan hidráulicamente el conjunto superior o bien, sobre otras formaciones acuíferas más competentes (acuíferos carbonatados), de las que reciben un aporte de recursos (Fig.1). Estas, a menudo, afloran hacia el interior formando una orla montañosa que limita la llanura y pueden continuar por debajo de la formación detrítica hasta entrar en contacto directo con el mar. Tal es el caso de las planas litorales del Levante español, según los autores Gómez-Gómez en el año 2003, Benavente y Calvache en el año 1981 y Calvache y Pulido en el año 1996.

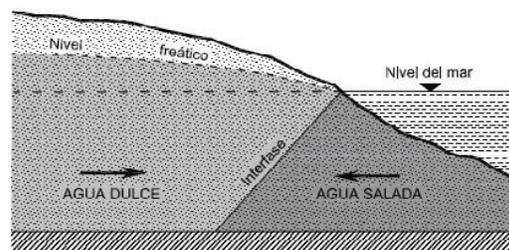
Esas formaciones carbonatadas, con mayor o menor grado de karstificación, constituyen otro tipo de acuíferos costeros. Estos, salvo alguna excepción, presentan un relieve bastante abrupto, lo que limita, en muchos casos, el desarrollo de una actividad productiva en su propio ámbito, aunque sí pueden ser fuentes de recursos para zonas situadas en sus proximidades. Estos acuíferos se encuentran representados en muchas partes del mundo, y particularmente tenemos importantes ejemplos en el mediterráneo.

Así solo en el litoral de España, Francia, Italia, Eslovenia, Malta, Croacia, Grecia y Turquía, se han identificado más de 60 acuíferos kársticos, según el autor Calaforra en el año 2004.

2.2. El fenómeno de la intrusión marina

En un acuífero costero, existe una relación de equilibrio natural entre el agua subterránea dulce del acuífero que descarga al mar y el agua salada de origen marino que pugna por penetrar tierra adentro, según el autor Custodio, en los años de 1995 y 2004, y que usualmente lo hace en forma de cuña apoyada en la base del acuífero dada su mayor densidad. La penetración de esta cuña dependerá de las características del acuífero: geometría, propiedades hidráulicas (permeabilidad, nivel piezométrico, etc.) y será función inversa del flujo de agua dulce que a lo largo de la costa descarga al mar. La intrusión marina es un proceso dinámico, donde el frente de agua salada avanza tierra adentro en los periodos de menor recarga del acuífero y retrocede hacia el mar cuando la recarga es mayor.

Figura 1. **Equilibrio agua dulce-agua salada**



Fuente: *La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles.*

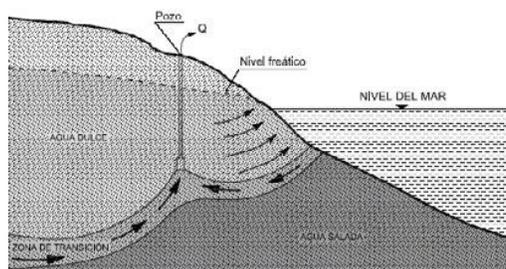
www.raco.cat/index.php/ECT/article/download/121417/167867. Consulta: 11 de octubre de 2013.

Este equilibrio natural puede verse alterado por la acción humana al modificar la descarga de agua dulce al mar; fundamentalmente, debido a extracciones por bombeos del acuífero, que provoca un descenso de la

superficie piezométrica y, en consecuencia, la penetración de la cuña de agua marina tierra adentro. Otras modificaciones del ciclo hidrogeológico, que alteren las entradas en el acuífero, como la construcción de presas en el cauce de un río que alimente un acuífero, pueden también alterar el equilibrio agua dulce - agua salada. Se puede definir la intrusión marina, como el movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, que desplaza al agua dulce, como consecuencia de una disminución del flujo de agua dulce hacia el mar debido a la intervención humana. Esta intrusión provocará el aumento de la salinidad en las aguas subterráneas con la consiguiente contaminación del acuífero costero y la limitación de su aprovechamiento para determinados usos.

Pero esa invasión de agua marina puede producirse de diferentes formas, al ser las más frecuentes: el avance horizontal de la interface hacia el interior (general o zonal), según los autores López y Geta, en el año 1995, el ascenso vertical en forma de cono (*upconing*) de la interface a favor de pozos o sondeos en los que tiene lugar un bombeo intensivo según el autor Morell, en el año 1989.

Figura 2. **Cono de intrusión producido por bombeo**



Fuente: La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles.

www.raco.cat/index.php/ECT/article/download/121417/167867. Consulta: 11 de octubre de 2013.

Existen otros mecanismos de salinización diferentes de la intrusión marina, que pueden producirse individualmente o acompañar a la intrusión, como la disolución de sales y lixiviado de minerales, evaporación; mezcla con otras aguas salinizadas procedentes de pasados procesos de intrusión o presencia de aguas congénitas asociadas a los sedimentos de origen marino, vertidos industriales.

2.3. Proceso de salinización

Causas que dan lugar a este proceso:

- Elevada demanda = Agricultura intensiva aproximada a un 80 %
- En regiones semiáridas (o áridas), precipitaciones escasas e irregulares
- Frecuente ausencia (o escasez) de recursos superficiales
- Explotación intensiva (a veces descontrolada del acuífero)
- Descensos piezómetros (sobre explotación)
- Presencia de procesos de salinización, incluida la intrusión marina
- Procesos contaminantes ácidos

2.4. Tipología básica de los acuíferos costeros

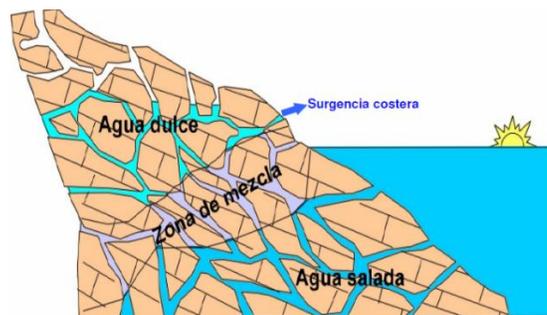
2.4.1. Kársticos

- Llanuras costeras
- Áreas moderadamente tectonizadas
- Áreas fuertemente tectonizadas

2.4.2. Detríticos

- Depósitos fluviales deltaicos
- Depósitos aluviales y llanuras costeras actuales
- Terrazas, conos y depósitos antiguos
- Dunas costeras

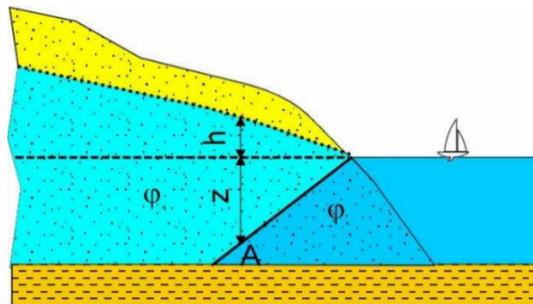
Figura 3. **Acuífero kárstico costero**



Fuente: *Acuífero costero, proceso de salinización*. <http://www.agua.uji.es/pdf/PRESRH22.pdf>.

Consulta: 11 de octubre de 2013.

Figura 4. **Acuífero detrítico**



Fuente: *Acuífero costero, proceso de salinización*. <http://www.agua.uji.es/pdf/PRESRH22.pdf>.

Consulta: 11 de octubre de 2013.

2.5. Deltas iónicos

Figura 5. Deltas iónicos

ION	Deltas	Procesos que pueden justificarlo	Procesos paralelos
SO ₄	- Δ SO ₄ + Δ SO ₄	Reducción de sulfatos Oxidación de sulfuros	Incremento [HCO ₃] Disminución [HCO ₃]
HCO ₃	- Δ HCO ₃ + Δ HCO ₃	Precipitación CaCO ₃ / CaMgCO ₃ Disolución CaCO ₃ / CaMgCO ₃	Disminución [Ca] y/o [Mg] Incremento [Ca] y/o [Mg]
NO ₃	- Δ NO ₃	Contaminación agrícola	
Ca	- Δ Ca + Δ Ca	Cambio iónico directo Precipitación CaCO ₃ Cambio iónico inverso Disolución CaCO ₃	Incremento [Na] ([Mg], [K]) Disminución HCO ₃ Disminución [Na] ([Mg], [K]) Incremento [HCO ₃]
Mg	- Δ Mg + Δ Mg	Cambio iónico directo/inverso Precipitación dolomita Disolución dolomita	Modificación otros cationes Disminución [HCO ₃] Disminución rMg/rCa Incremento [HCO ₃]
Na	- Δ Na + Δ Na	Cambio iónico inverso Cambio iónico directo	Incremento [Ca] y/o [Mg] Disminución [Ca] y/o [Mg]
K	- Δ K + Δ K	Adsorción minerales arcilla Cambio iónico inverso Cambio iónico directo, acompañando al Na	Disminución [Na] e incremento [Ca] Incremento [Na] y disminución [Ca]

Fuente: *Acuífero costero, proceso de salinización*. <http://www.agua.uji.es/pdf/PRESRH22.pdf>.

Consulta: 11 de octubre de 2013.

2.6. Dureza del agua

2.6.1. Nociones básicas de química

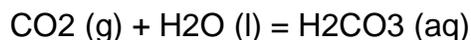
Cuando las sustancias iónicas se disuelven en agua, estas se separan en los iones que las constituyen. Por ejemplo, cuando el cloruro de sodio NaCl (sal común) se disuelve en agua se forman el ion sodio Na⁺ (el positivo o catión) y el

ion cloruro Cl^- (el negativo o anión). Estos iones permanecen en solución a menos que ocurra algo que los haga precipitarse como sólidos; por ejemplo si el agua se evapora de una solución salina, la solución se satura y cristales de sal comienzan a precipitar. El proceso de disolución no es una reacción química por lo que puede revertirse con medios físicos en lugar de químicos.

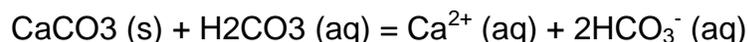
2.6.2. Las causas de la dureza

Por lo general, la dureza del agua es causada por la presencia de iones calcio (Ca^{2+}) e iones magnesio (Mg^{2+}) disueltos en el agua. Otros cationes, como el aluminio (Al^{3+}) y el hierro (Fe^{3+}) pueden contribuir a la dureza, sin embargo su presencia es menos crítica.

La forma de dureza más común y problemática es la causada por la presencia de bicarbonato de Calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). El agua la adquiere cuando la lluvia pasa por piedra caliza (CaCO_3). Cuando el agua de lluvia cae disuelve dióxido de carbono (CO_2) del aire y forma ácido carbónico (H_2CO_3), por lo que se acidifica ligeramente:



El carbonato de calcio (CaCO_3) no es muy soluble en agua, sin embargo, cuando el ácido diluido pasa por la piedra caliza reacciona formando bicarbonato de calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) que sí es soluble en agua:



Por lo tanto, el agua de lluvia toma iones calcio Ca^{2+} e iones bicarbonato HCO_3^- y se vuelve dura. Cuando el agua dura se calienta las dos reacciones

anteriores se revierten y se forma carbonato de calcio, agua y dióxido de carbono:



El carbonato de calcio (CaCO_3) es mucho menos soluble en agua que el bicarbonato de calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) por lo que se precipita formando un sólido conocido como sarro, incrustaciones o incrustaciones de calcio. Como este tipo de dureza es fácil de remover se le conoce como *dureza temporal*. El sarro aparece, por lo general, alrededor de sistemas de agua caliente y elemento de calentamiento. Sin embargo, si el agua es extremadamente dura se puede formar sarro en tuberías de agua fría.

Otros tipos de dureza temporal son causados por la presencia de iones magnesio Mg^{2+} y la precipitación de hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) puede contribuir a los problemas de incrustaciones.

La combinación de iones de calcio Ca^{2+} y magnesio Mg^{2+} con iones cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) y nitrato (NO_3^-) se conoce como dureza permanente. Por ejemplo, en algunas áreas el sulfato de calcio CaSO_4 puede causar una dureza considerable. La dureza permanente no puede ser removida hirviendo el agua.

El término **dureza** total se usa para describir la combinación de dureza de magnesio y calcio. Sin embargo, los valores de dureza se reportan, por lo general, en términos de carbonato de calcio (CaCO_3) porque es la causa principal de las incrustaciones.

La clasificación estándar se muestra a continuación:

Tabla I. **Clasificación de la dureza del agua**

Dureza	mg/L como CaCO ₃
Moderada	60-120
Dura	120-180
Muy Dura	Más de 180

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. p.1.

2.6.3. Problemas causados por la dureza

- Se necesita más jabón para lavar (el jabón no hace espuma). Algunos detergentes modernos son menos eficientes porque los aniones (también conocidos como surfactantes), reaccionan con los iones calcio Ca²⁺ y magnesio Mg²⁺ en lugar de retener las partículas de mugre en suspensión.
- El jabón hecho a base de grasa animal puede reaccionar con el ion calcio Ca²⁺ y magnesio Mg²⁺ formando un precipitado que puede irritar la piel y arruinar la ropa.
- Algunos alimentos, particularmente los frijoles y los chícharos, cuando son cocidos con agua dura se endurecen. Los iones de calcio alteran algunas moléculas dentro de los frijoles, por lo que la estructura que se forma no deja pasar el agua y el frijol permanece duro. Una manera simple para contrarrestar

este efecto es la adición de bicarbonato de sodio (NaHCO_3) al agua donde se van a cocer los frijoles.

- El sarro puede tapar tuberías y conexiones. Además de hacer menos eficiente hasta en un 90 % los elementos de calefacción con una capa de 25mm de carbonato de calcio (CaCO_3).

2.6.4. Ablandamiento

Existen tres maneras básicas para ablandar el agua:

- Forzar la precipitación de las sustancias insolubles, como el carbonato de calcio CaCO_3 y el hidróxido de magnesio $\text{Mg}(\text{OH})_2$, antes que entren al sistema de agua.
- Remover los iones de calcio Ca^{2+} y magnesio Mg^{2+} del agua.
- Evitar que los iones de calcio (Ca^{2+}) del carbonato de calcio CaCO_3 se precipiten por medio de la formación de complejos.

a. Ablandamiento cal- soda-*Lime Softening*

Se agrega cal (hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$) y soda ash (carbonato de sodio Na_2CO_3) al agua para causar la precipitación del carbonato de calcio CaCO_3 y magnesio $\text{Mg}(\text{HO})_2$.

En sistemas municipales se agrega el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al agua y el sólido precipitado se remueve por medio de la sedimentación. Algunas pequeñas partículas permanecen por lo que se burbujea dióxido de carbono para convertir estas pequeñas partículas en bicarbonatos solubles. Debido a que alguna de esta dureza se conserva, este proceso es conocido como ablandamiento parcial.

En una escala menor se puede agregar carbonato de sodio Na_2CO_3 al agua dura que se utilizará para lavar ropa.

b. Intercambio catiónico

Este proceso sustituye los iones calcio Ca^{2+} y magnesio Mg^{2+} por otros iones que no contribuyen a la dureza, como el ion sodio Na^+ y el ion potasio K^+ . Esto se logra haciendo fluir el agua por un contenedor lleno de una resina que contenga los iones sodio y potasio. Los iones en la resina son intercambiados por los iones causantes de la dureza del agua. Una vez que todos los iones de la resina han sido intercambiados, la resina ya no puede remover más iones calcio Ca^{2+} y magnesio Mg^{2+} hasta que esta se regenere usando cloruro de sodio NaCl o cloruro de potasio KCl . Este método es más común para sistemas domésticos. El intercambio catiónico es un método de ablandamiento total porque remueve toda la dureza del agua.

c. Formación de complejos

Otro de los métodos usados en los ablandadores domésticos de agua es la adición de polifosfatos (que contengan el ion $\text{P}_6\text{O}_{18}^{6-}$) al agua. Estos iones rodean los iones calcio Ca^{2+} disueltos y evitan que estos se precipiten como carbonato de calcio CaCO_3 . Este proceso es conocido como formación de complejos.

2.6.5. Sobreablandamiento

El exceso de ablandamiento del agua también puede tener efectos adversos en la corrosión de las tuberías de hierro y acero galvanizado. Agua muy blanda puede también contribuir al desgaste de los tanques de concreto.

Normalmente, el interior de tuberías ferrosas son protegidas por una capa que se forma cuando el agua fluye dentro de ellas, esta capa contiene carbonato de calcio CaCO_3 y hierro Fe. Si el agua es muy blanda (agresiva) pasa por una tubería galvanizada la capa protectora de zinc es lentamente removida exponiendo el acero. Además, si no existen suficientes iones de calcio Ca^{2+} en el agua, los componentes de calcio del concreto pueden lixiviarse y causar deterioro en la integridad de la estructura.

Por esta razón, debe tenerse mucho cuidado cuando se usen métodos de ablandamiento total en agua que pasará por tuberías ferrosas.

2.6.6. Nombres químicos comunes

Bicarbonato – NaHCO_3 Bicarbonato de sodio

Sosa Cáustica – NaOH Hidróxido de sodio

Tiza– tipo de piedra caliza que es, en su mayoría, carbonato de calcio

Cal – CaOH Hidróxido de calcio

Na_2CO_3 Carbonato de sodio

Na_2OH Hidróxido de sodio

Cal viva* - CaO Oxido de calcio

2.7. Calidad del agua

El agua pura en un sentido químico (H_2O) es imposible hallarla en la naturaleza. Ella sigue su ciclo hidrológico interactuando con los principales factores de la biosfera (atmósfera, suelos, rocas.) Es, por tanto, usual encontrar una cantidad muy variable de compuestos suspendidos y subterráneos.

En las últimas décadas se ha incrementado el número de estos compuestos (naturales y no naturales) producto de los residuales creados en las actividades sociales y productivas del ser humano.

El concepto de calidad del agua estará siempre relacionado con el uso que le queremos dar al agua. Un ejemplo típico de esta situación se comprende al evaluar el contenido de nitrógeno de una fuente dada por un usuario agrícola y otro sanitario; al primero le conviene una alta concentración de nitratos, al segundo le afecta si sobrepasa los 45 mg/l.

La terminología empelada en esta materia tradicionalmente ha sido mal interpretada y poco comprendida. Por ello, que decidimos plantear algunas definiciones brindadas por el *US. National Technical Advisory Commmite on Water Quality Criteria 1968*, y que fueron recomendadas por la UNESCO.

2.8. Criterio de calidad

Es el requerimiento científico en el cual se basa una decisión o juicio que concierne al posible uso del agua para un fin determinado.

2.9. Objetivos de calidad

Diferentes niveles dados para un parámetro de calidad que se desea obtener por medio del manejo de programas de calidad de las aguas en los cuales se integran las consideraciones de costo-beneficio.

2.10. Estándares de calidad

Es un límite legal de contaminación que se establece por medio de la autoridad estatal.

La calidad de las aguas con respecto a sus usos principales, puede clasificarse de la manera siguiente.

- Agua de consumo público
- Para la industria alimenticia
- Para industrias especiales
- Para la industria en general
- Recreación
- Irrigación
- Flora y fauna
- Navegación

2.11. Parámetro de calidad

La correcta selección de los parámetros de calidad de las aguas, que se tomarán en cuenta, en un estudio hidroquímico dado, depende de los objetivos que se deseen alcanzar.

Este importante aspecto es usualmente relegado a un segundo plano que traen efectos económicos negativos. La tabla núm. II, pretende recoger, al mismo tiempo que los clasifica en grupos, los parámetros de calidad que usualmente son utilizados en los programas de monitoreo de calidad de las aguas. A continuación, principales parámetros de calidad de las aguas y sus unidades.

Tabla II. **Parámetros físicos**

Parámetros físicos	
Temperatura	°C
Turbidez	Unidades de S ₁ O ₂
Olor	Grados
Sabor	Escala cualitativa
Acides	Unidades de pH
Conductividad eléctrica	Micromhos a 25 °C
Potencial Redox	mv

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. P.2.

Tabla III. **Parámetros orgánicos**

Inorgánicos	
Calcio	mg/l
Magnesio	mg/l
Sodio	mg/l
Potasio	mg/l
Bicarbonato	mg/l

Continuación de la tabla III

Inorgánicos	
Carbonato	mg/l
Sulfato	mg/l
Nota: También los diferentes tipos de dureza, alcalinidad y (SST) sales solubles totales.	

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. p.2.

Tabla IV. **Gases**

Gases	
Acido carbónico	mg/l
Oxígeno disuelto O ₂	mg/l
Ácido Sulfídrico SH ₂	mg/l
Cloro Cl ₂	mg/l

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. p.2.

Tabla V. **Parámetros inorgánicos**

Inorgánicos (microconstituyentes)	
Boro	mg/l
Amonio	mg/l
Nitratos	mg/l
Nitritos	mg/l
Fosfatos	mg/l
Fluoruros	mg/l
Ácido silícico	mg/l
Hierro	mg/l
Manganeso	mg/l
Aluminio	mg/l
Arsénico	mg/l
Selenio	mg/l
Bromuro	mg/l
Ioduros	mg/l

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. P.2.

Tabla VI. **Metales pesados**

Metales pesados	
Bario	mg/l
Berilio	mg/l
Cadmio	mg/l
Cromo	mg/l
Cobre	mg/l
Plomo	mg/l
Mercurio	mg/l
Nickel	mg/l
Zinc	mg/l
Cobalto	mg/l
Nota: Todos estos metales son tóxicos	

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. p.3.

Tabla VII. **Indicadores de riesgo de enfermedades gastrointestinales**

Indicadores de riesgo de enfermedades gastrointestinales	
Grupo Coliforme	NMP
Streptococci fecal	--
Escherichea Coli	--
Clostridiumperfringens	--

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. p.3.

Tabla VIII. **Organismos patógenos**

Organismos patógenos
Salmonella tífica
Salmonella paratífica
Salmonella enteritis
Otros tipos de salmonella
Shigella
Vibrio Comna
Mycobacterium tuberculosis

Continuación de la tabla VII

Organismos Patógenos
Entomaebea histolytica

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. p.3.

Tabla IX. **Virus**

Virus
Coxsackie
ECHO
Poliviruses
REO-Virus

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. p.3.

Tabla X. **Otros parámetros microbiológicos**

Otros parámetros microbiológicos
Desulfovibrio
Desuppuricons
Nitrosomas
Nitrococcus
Nitrobacter
Thiobacillius

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. p.3.

2.12. **Chequeo de los análisis químicos**

El especialista, una vez que se dispone a utilizar los datos de laboratorio para comenzar un proceso de evaluación hidroquímica a partir de los análisis químicos de las aguas, debe verificar su calidad. Existen diferentes reglas utilizadas, casi todas, basadas en el principio de electronulidad de los iones presentes. Es importante mencionar que estos métodos no son absolutos y que la igualdad de aniones y cationes, muchas veces, se encuentra bastante lejos de la realidad sin que exista un error analítico en el análisis del agua. A continuación se exponen algunas de las reglas generales que se recomiendan.

2.13. Reglas generales para el chequeo de un análisis químico

- La diferencia entre los cationes y los aniones en meq/l no debe ser superior al 4 % en el rango de 2-8 meq/l y hasta 2 % en el rango de 8-20 meq/l
- Los meq/l tanto de los cationes como de los aniones multiplicados por 100 deben ser igual aproximadamente al valor de la conductividad (micromhos/cm a 25 °C). El % de error no debe ser mayor de 5 %
- Para aguas con concentraciones menores de 20 meq/l y un pH en el rango de 6-9 unidades. La sumatoria de la multiplicación de la “conductividad equivalente a dilución infinita (25 °C)” por la concentración de los iones principales expresados en meq/l (conductividad teórica) debe ser igual aproximadamente a la “conductividad real” hallada en el campo o laboratorio.
- Este método es una modificación del método de la “conductividad diluida”. Los factores que a continuación se exponen fueron publicados en 1960 y pueden ser utilizados en los cálculos de la “conductividad teórica”

Tabla XI. Factores de conductividad

Factores de conductividad			
Ion	Factor	Ion	Factor
CO ₃ H	43,6	K	72,0
Ca	52,0	Na	48,9

Continuación de la tabla XI

Ion	Factor	Ion	Factor
CO ₃	84,6	SO ₄	73,9
Cl	75,9	Mg	46,6
NO ₃	71,0		

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. p.4.

Por lo tanto se debe interpretar que un meq/l de Mg tiene una contribución a la “conductividad teórica” de 40,6 micromhos/cm y así sucesivamente para el resto de los iones.

En la tabla se presenta un análisis químico de agua al cual se le aplicará la metodología de chequeo anteriormente explicada a manera de ejemplo de este método.

Tabla XII. **Ejemplo, chequeo de un análisis químico**

Cationes	meq/l	mg/l	meq/l %
Ca	3,60	72,0	58,82
Mg	1,50	18,0	24,51
Na	1,00	23,0	16,34
K	0,02	0,8	0,33
Suma	6,12	113,8	100,0

Continuación de la tabla XII

Aniones	meq/l	mg/l	meq/l %
CO ₃ H	4,60	280,6	76,54
Cl	0,91	32,3	15,54
SO ₄	0,50	24,0	8,32
Suma	6,01	336,9	100,0

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. p.5.

Pozo RH-2(1980), pH 7,6 conductividad 593 micromhos. SST 45/mg/l:

Calculamos la diferencia entre los aniones y los cationes en meq/l. Para el ejemplo es de 0,11 meq/l.

Calculamos el porciento de esta diferencia comparado con los meq/l de aniones y cationes.

Comparamos estos resultados con la recomendación dada anteriormente de la forma siguiente:

$$\text{Diferencia: } 6,12 - 6,01 = 0,11$$

$$\%: 0,11 / 6,12 = 1,80$$

$$: 0,11 / 6,01 = 1,83$$

$$\text{La mayor: } 1,83$$

$$1,83 \quad 4,00 \%$$

Por lo que concluimos que este análisis químico aparentemente no tiene errores que lo invaliden.

Multiplicamos el valor en meq/l de los aniones o cationes por 100. Este resultado debe ser aproximado a la conductividad eléctrica.

$$6,01 * 100 = 601 \text{ micromhos/cm}$$

$$\text{Real} = 593 \text{ micromhos/cm}$$

$$601 \quad 593 \text{ micromhos/cm}$$

Luego el análisis parece correcto.

Aplicando la modificación del método de la “Conductividad diluida” calculamos primero la “conductividad teórica” utilizando los factores anteriormente expuestos.

<u>Ión</u>	<u>meq/l *</u>	<u>Factor</u>	<u>= Micromhos/cm</u>
Ca	3,60	52,0	187,2
Mg	1,50	46,6	69,9
Na	1,00	48,9	48,9
K	0,02	72,0	1,4
CO ₃ H	4,60	43,6	200,6
Cl	0,91	75,9	69,1
SO ₄	0,50	73,9	37,0

Conductividad teórica = 614,1

Conductividad real = 593,0

En el ejemplo desarrollado los tres criterios aplicados señalan que el análisis químico chequeado se puede evaluar como aceptable.

2.14. Principales relaciones hidroquímicas o iónicas

Como se mencionó anteriormente el agua circula a través de su ciclo hidrológico.

Sus componentes cambian en un sentido dinámico continuamente. Procesos diferentes ocurren. La interacción entre las aguas que infiltran y percolan con el suelo y las rocas constituyen el lavado de los materiales geológicos, proceso mediante el cual el agua gana o pierde diferentes compuestos. Los procesos físicos y químicos, como la evaporación, precipitaciones, etc., que ocurren constantemente en la naturaleza transforman la composición física y química de las aguas. Las relaciones hidroquímicas se fijan en un lugar y tiempo dado; luego, cambian a medida que el agua recorre uno u otro medio. Evaluaciones muy importantes pueden realizarse mediante las comparaciones entre las relaciones hidroquímicas de diferentes aguas.

2.15. Clasificaciones hidroquímicas

Una revisión de la literatura internacional sobre este punto nos presenta decenas de clasificaciones propuestas. Cada una de ellas responde a diferentes objetivos.

La selección de una u otra es siempre un compromiso que debe estar relacionado con los objetivos del estudio. A continuación recomendamos las que a nuestro criterio presentan mayores ventajas.

- Clasificación de Alekin modificada
- Clasificación de Palmer
- Clasificación de shoeller

Algunos ejemplos prácticos que muestran sus ventajas y desventajas.

2.15.1. Clasificación de Alekin modificado

Esta clasificación parte de la comparación de los pesos equivalentes expresados en porciento de los macro constituyentes de agua dada. Las reglas a seguir son las siguientes:

- Cuando un catión o anión presenta más del 50 %, expresado en meq/l, el tipo de agua recibe el nombre de ión.
- Cuando un anión o catión contiene más del 33 %, expresado en meq/l, el tipo de agua recibe un nombre combinado.

Los tipos más frecuentes en las aguas naturales son los siguientes:

- Bicarbonatadas cálcicas
- Bicarbonatadas cálcicas magnésicas
- Clóricas sódicas
- Bicarbonatadas magnésicas

Se recomienda en esta modificación a la clasificación de “Alekin” incluir las sales solubles totales al inicio para representar el índice salino del agua que se clasifique.

2.15.2. Clasificación de Palmer

La clasificación de Palmer, tiene los fundamentos siguientes:

- Las características básicas de las aguas naturales dependen de su salinidad.

Sales de ácidos fuertes Cl, SO₄ dan salinidad.

Sales de ácidos débiles CO₃H dan alcalinidad

Luego, las sales que producen salinidad son aquellas que no se hidrolizan.

Las alcalinidades producidas por las bases alcalinas y las sales hidrolizables.

- Todos los iones (cationes) pueden causar salinidad, pero de los aniones sólo corresponden a los ácidos fuertes.
- Los iones se dividen en tres grupos
 - Álcalis (Na, K, Li)
 - Tierras alcalinas (Mg, Ca, Si, Ba)
 - Hidrogeno (H)
- La unidad de trabajo es el meq/l y el meq/l expresado como %.

Palmer también define las propiedades de las aguas de la manera que a continuación se expone:

- (S₁) Salinidad primaria (salinidad de álcalis)
- (S₂) Salinidad secundaria (dureza permanente)
- (S₃) Salinidad Terciaria (Acidez)
- (A₁) Alcalinidad primaria (alcalinidad permanente)
- (A₂) Alcalinidad secundaria (Alcalinidad temporal)

- Por clasificación se asume:
 - Álcalis (Na, K, Li)
 - Tierras alcalinas (Mg, Ca, Si, Ba)
 - Ácidos Fuertes (SO₄, Cl)
- Las aguas se clasifican de la manera siguiente:

Clase 1: $d < a$; ácidos fuertes < álcalis

$2d$ = salinidad primaria (S_1)

$2(a-d)$ = álcalis primaria (A_1)

$2b$ = alcalinidad secundaria (A_2)

Clase 2: $d = a$; ácidos fuertes = álcalis

$2a$ o $2d$ = salinidad primaria (S_1)

$2d$ = Salinidad secundaria (S_2)

Clase 3: a ; $d < a+b$

$2a$ = salinidad primaria (S_1)

$2(d-a)$ = salinidad secundaria (S_2)

$2(a-b-d)$ = Alcalinidad secundaria (A_2)

Clase 4: $d = (a+b)$

$2a$ = Salinidad primaria (S_1)

$2b$ = Salinidad secundaria (S_2)

Clase 5 $d > (a+b)$

2a = Salinidad primaria (S_1)

2b = Salinidad secundaria (S_2)

2 (d-a-b) = Salinidad terciaria (S_3)

La extensión de esta clasificación utilizando un diagrama triangulo es la conocida representación de **Piper-Palmer**. Usualmente, las aguas superficiales pertenecen a las clases (1), (2), o (3); las aguas subterráneas pueden ser de cualquier grupo, aguas de salmuera, más o de origen minero pueden pertenecer al grupo 5.

En el cuadro siguiente se exponen diferentes aguas clasificadas según Palmer.

Tabla XIII. **Clasificación según Palmer**

Origen	S_1	S_2	S_3	A_1	A_2	Clase
Cárcica	0,52	0,38	--	--	12,82	3
Intrusionada	104,84	95,52	--	--	9,32	3
Agua de mar	959,74	259,46	--	--	--	4
Agua volcánica	1,42	1,06	0,06	--	--	5

Fuente: MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. p.10.

2.15.3. La clasificación de Shoeller

Shoeller, clasificó las aguas atendiendo a su contenido en compuestos disueltos dándole el orden de importancia siguiente:

- Cloruros
- Sulfatos
- Bicarbonatos más carbonatos
- Índice de intercambio de gases (IIB)
- Relaciones entre aniones y cationes}

Este sistema tiene seis tipos de aguas principalmente de acuerdo con la concentración de cloruros y cuatro sub-grupos de acuerdo con el contenido de sulfato. También difieren tres niveles en los CO_3 .

El índice de intercambio de gases (IIB), se utiliza para indicar la relación entre los iones que se intercambian en relación con los originalmente presentes en el agua.

La importancia de los aniones y cationes se toma en consideración.

2.16. Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos

Para el estudio e interpretación de datos derivados de análisis hidroquímicos, comúnmente, se utilizan diagramas incorporados en *software* como *Aquachem* y *Diagrammes*. Entre estos están:

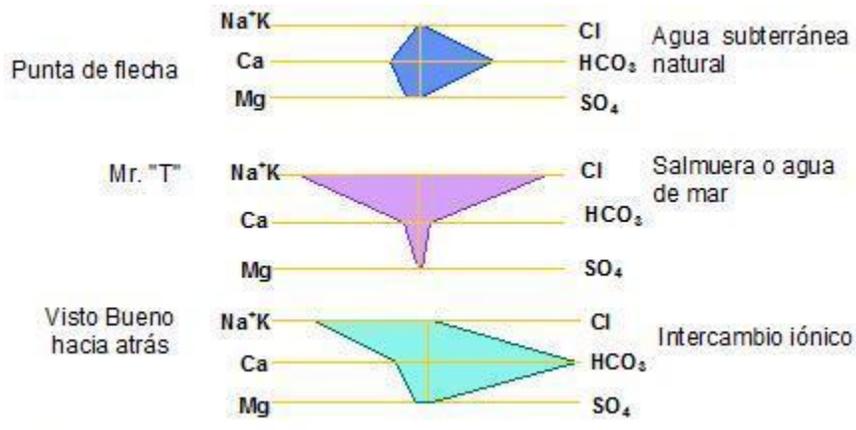
Piper, Stiff, Schoeller, Durov, Ternary, mapas de distribución de diagramas de Stiff, Ludwig-Langelier, diagrama de Gibbs (boomerang), Wilcox y X-Y Scatter (graficos binarios), entre otros. A continuación se describe la construcción y uso de algunos de estos gráficos.

2.16.1. Digrama de Stiff

Esta gráfica está compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos al unir un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na^+ se confronta con el Cl^- , el Ca^{+2} con el HCO_3^- y el Mg^{+2} con el SO_4^{-2} (a veces también se pueden mostrar otros dos iones, como el Fe^{+2} contra el NO_3^-). Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/l.

Dos características sobresalen en este tipo de diagrama: por un lado permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica), en la gráfica siguiente se muestran algunas apreciaciones de este diagrama que caracterizan varios tipos de aguas.

Figura 6. Diagrama de Stiff típicos



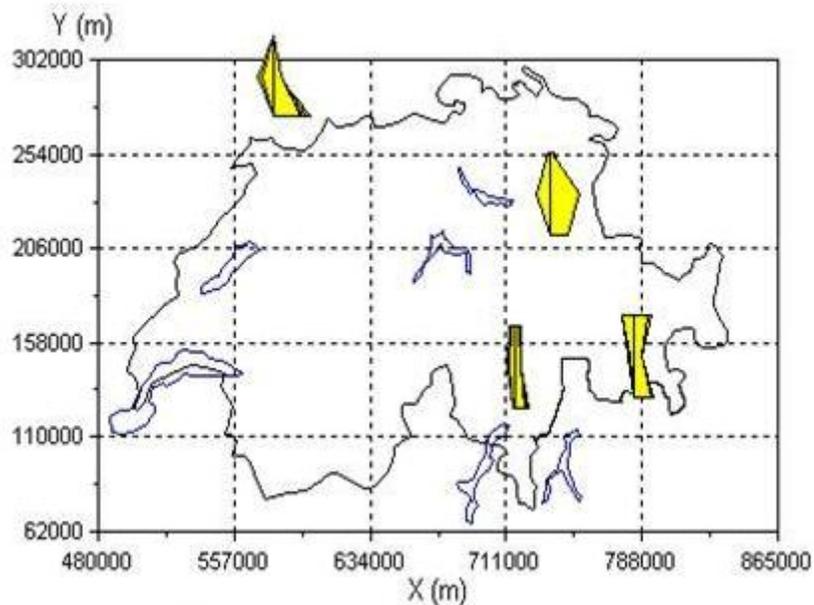
Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*

<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

Permite apreciar los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre cationes y entre aniones de una muestra.

También pueden representarse en un mapa, con lo que se visualiza rápidamente la variación espacial de la mineralización del agua en el acuífero.

Figura 7. **Distribución del diagrama de Stiff**



Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*
<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

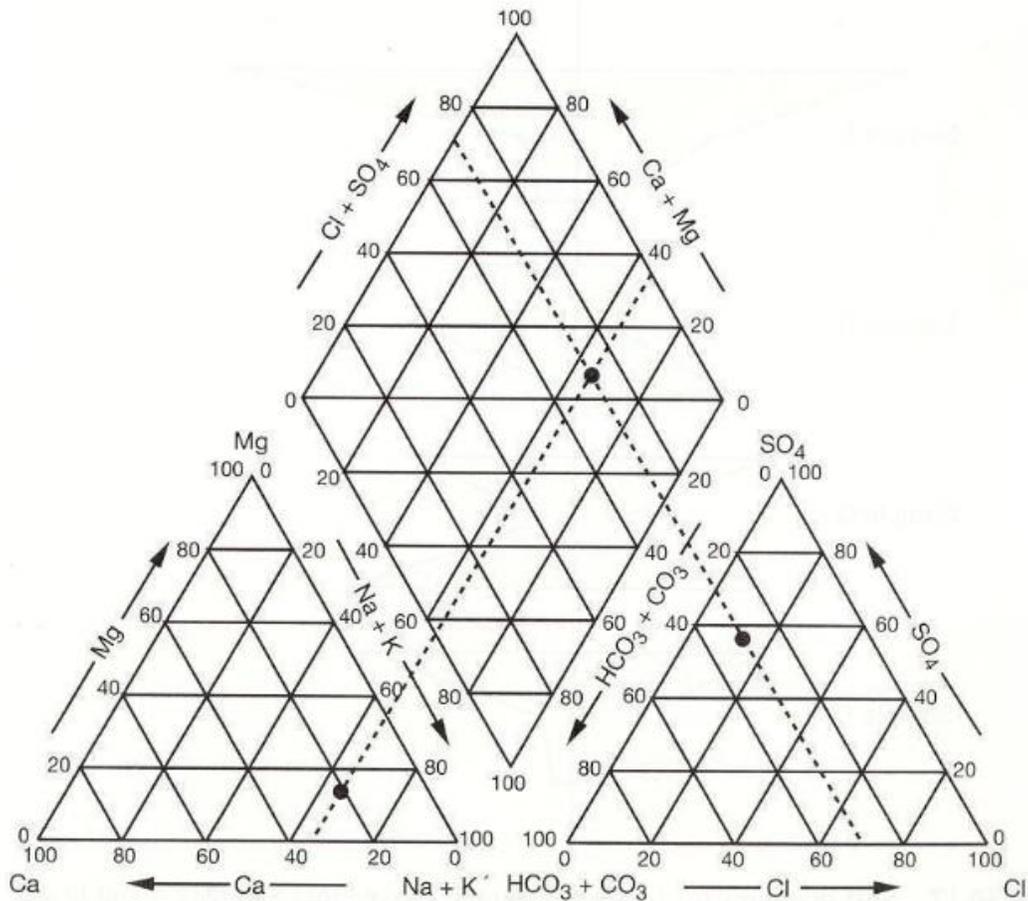
2.16.2. Diagrama de Piper:

Es una de las gráficas más utilizadas. En él se incluyen aniones y cationes en forma simultánea. Este gráfico permite representar muchos análisis sin generar confusiones. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas según el autor Custodio en el año 1965.

Está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes son Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. Los vértices del triángulo de aniones son SO_4^{-2} , Cl^- y HCO_3^- . Los datos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central en el

que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Las concentraciones de los iones dadas en meq/l se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100 % de un anión o catión. (Ver figura siguiente).

Figura 8. Esquema del diagrama de Piper



Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*

<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

Para construir el diagrama de Piper se procede de la siguiente manera:

Paso 1

Si las concentraciones están en mg/l, se convierten a meq/l dividiendo los mg/l de cada parámetro por el peso del miliequivalente correspondiente.

Ejemplo, para convertir los 84 mg/l de Ca⁺² correspondientes al punto 1 dividimos por 20, que es lo que pesa un meq de Ca⁺². El resultado es 4,2 meq/l (ver tabla).

Figura 9. Datos para el diagrama de Piper

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	peso de un meq	Concentración en meq/l)
Ca ⁺²	84	20	4,20
Mg ⁺²	7,85	12,15	0,65
Na ⁺	14,7	23	0,64
K ⁺	1,43	39	0,04

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	peso de un meq	Concentración en meq/l)
HCO ₃ ⁻	312	61	5,11
Cl ⁻	12,8	35,5	0,36
SO ₄ ⁻²	18,9	48	0,39

Fuente: Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.

<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

Paso 2

Expresamos como porcentaje los meq/l de cada parámetro. Para ello, primero, sumamos los aniones y los cationes presentes en la muestra. Luego, dividimos la concentración de cada parámetro por la suma de aniones o cationes según corresponda.

Por ejemplo, para expresar los 4,2 meq/l de calcio que hay en la muestra, se debe tener en cuenta que la suma de cationes es 5,53 meq/l, así.

$$\%Ca \text{ muestra} = \frac{4,2}{5,53} * 100 = 76 \%$$

Figura 10. % de aniones y cationes para el diagrama de Piper

Cationes		
Parámetro	Concentración (meq/l)	Concentración En (%)
Ca ⁺²	4,2	76%
Mg ⁺²	0,65	12%
Na ⁺	0,64	12%
K ⁺	0,04	1%
Suma	5,53	100%

Aniones		
Parámetro	Concentración (meq/l)	Concentración En (%)
HCO ₃ ⁻	5,11	87%
Cl ⁻	0,36	6%

Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*

<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

Paso 3

Dibujar las proporciones en los gráficos triangulares. Se debe tener en cuenta que estos triángulos muestran solo las proporciones entre los aniones o los cationes mayores, no sus concentraciones. Tal como se muestra en la figura de inicio, en unos de los vértices del triángulo de cationes se dibuja la suma de K^+Na^+ , por tanto, las cantidades que se incluirán en la gráfica son las siguientes.

Figura 11. Concentración en % para Piper

Cationes	
Parámetro	Concentración En (%)
Ca^{+2}	76%
Mg^{+2}	12%
K^+Na^+	12%
Suma	100%
Aniones	
Parámetro	Concentración En (%)
HCO_3^-	87%
Cl^-	6%
SO_4^{-2}	7%
Suma	100%

Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*

<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

Ahora se grafica el punto correspondiente a los cationes, conformado por 76 % de Ca, 12 % de Mg y 12 % de Na+K. Para ello, utilizamos con rectas auxiliares la opuesta de cada uno de los vértices donde están el Ca, Mg y Na+K respectivamente.

Paralela a la recta opuesta al vértice del Ca, trazamos una línea por donde está el 76 % de Ca (Línea verde).

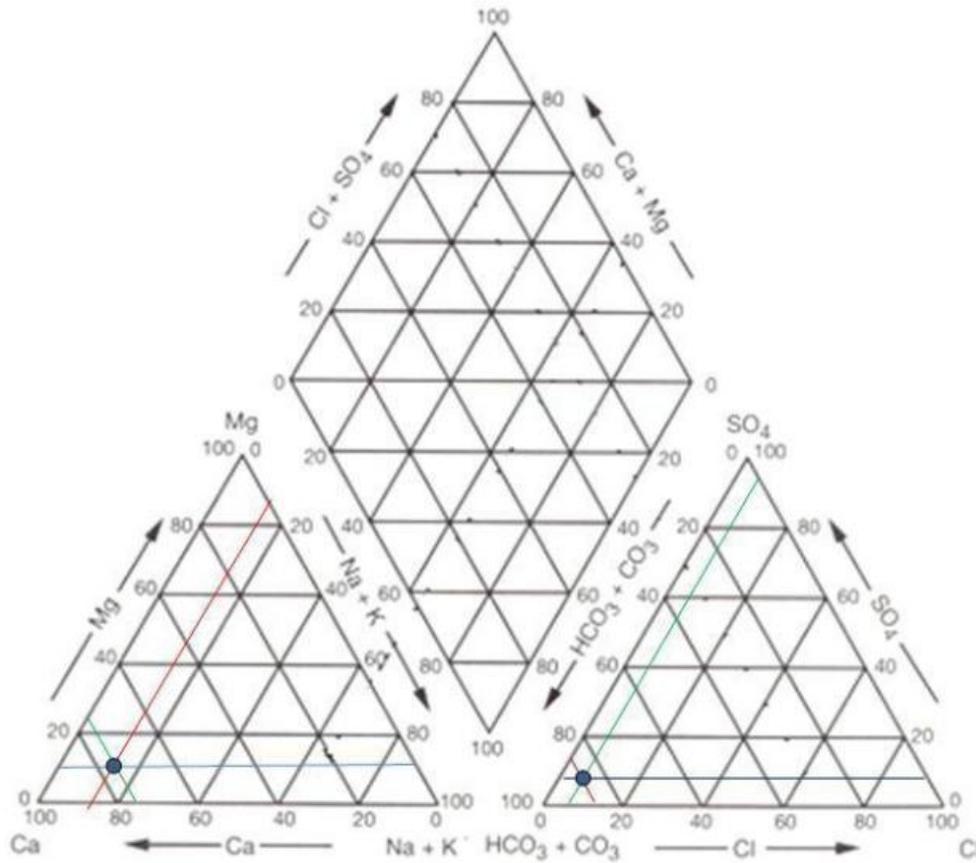
Paralela a la recta opuesta al vértice del Mg, trazamos una línea por donde está el 12 % de Mg (línea azul).

Paralela a la recta opuesta al vértice del Na+K, trazamos una línea por donde está el 12 % de Na+K (línea roja). En el sitio donde se cortan las tres rectas, se coloca el punto correspondiente a 76 % de Ca, 12 % de Mg y 12 % de Na+K.

De igual forma se procede para los aniones conformado por 87 % de HCO₃, 3, 6 % de Cl y 7 % de SO₄.

El resultado de todo este procedimiento se muestra en la figura siguiente.

Figura 12. Localización de aniones y cationes



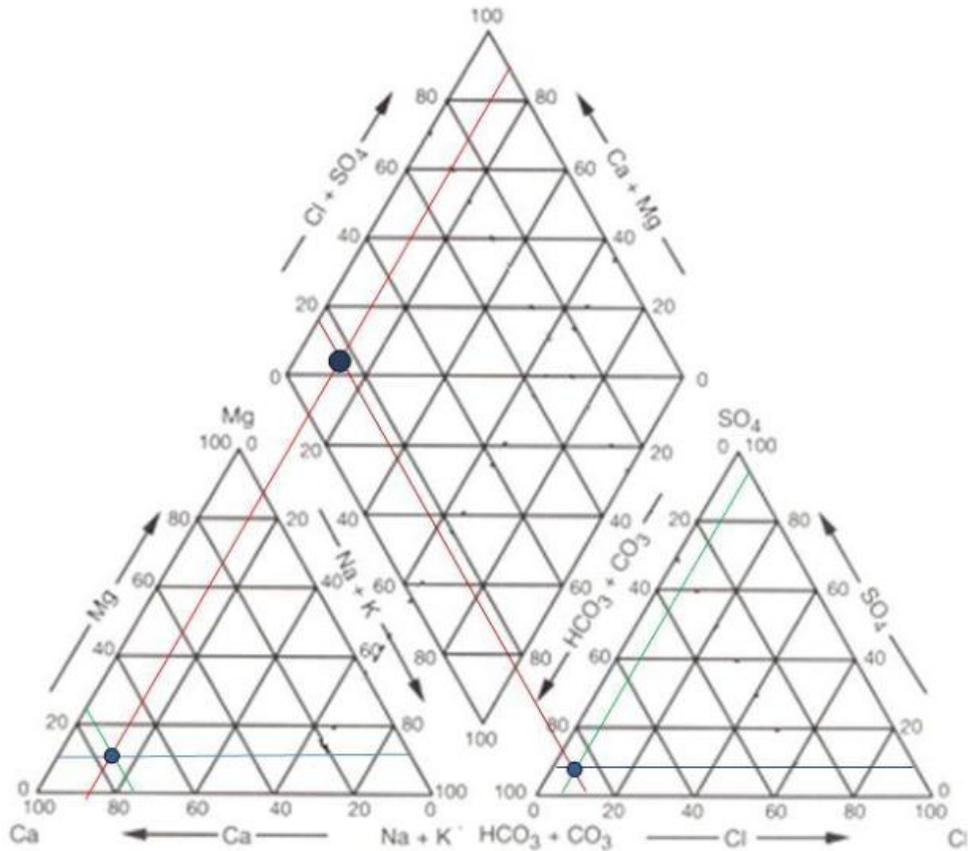
Fuente: Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.

<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

Paso 4

Lo que sigue es proyectar ambos puntos en el rombo central, para ello se prolongan las líneas rojas de ambos triángulos. Donde se corten dichas líneas se localiza el punto que caracteriza la muestra, la cual se clasifica como Bicarbonatada – Cálcida ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$).

Figura 13. **Proyección de los puntos de aniones y cationes**



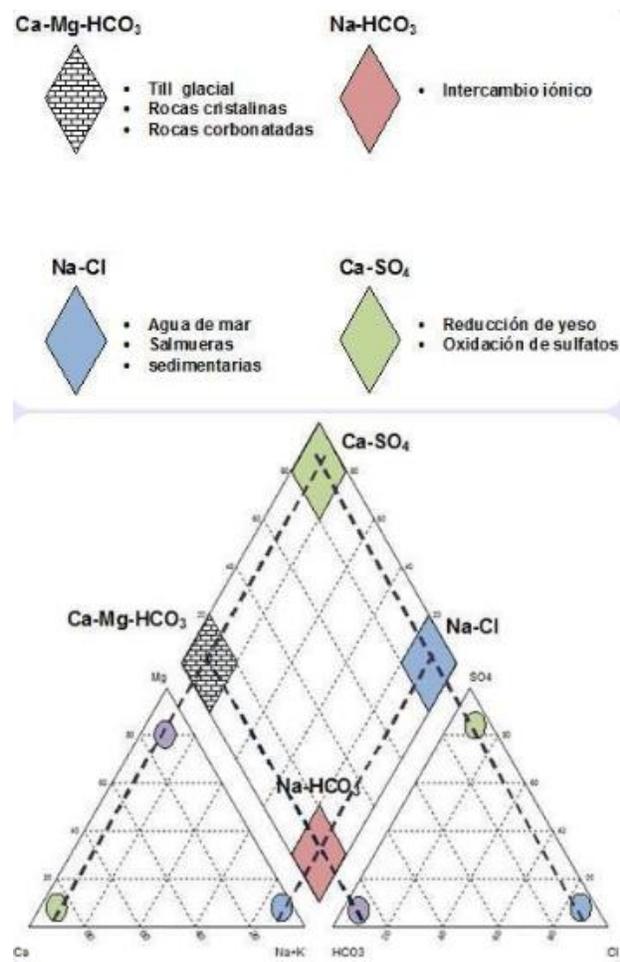
Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*
<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

Lo más importante es saber que este diagrama sirve para:

- Visualizar la evolución geoquímica de las aguas subterráneas
- Detectar procesos como intercambio catiónico
- Detectar mezclas entre dos tipos de agua
- Detectar procesos de dilución o precipitación de especies iónicas

- Junto con la cartografía y localización de los puntos de muestreo se permite validar o lanzar hipótesis de la localización de la zona de recarga de los acuíferos.
- A continuación se presentan casos típicos de agua, su clasificación y los procesos o rocas relacionadas con las mismas.

Figura 14. **Casos típicos de agua**



Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*

<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

2.16.3. Schoeller- Barkalof

Se disponen varias semirrectas o columnas verticales paralelas, igualmente espaciadas y divididas en escala logarítmica y con el mismo módulo. A cada semirrecta se le asocia un anión o un catión, excepto la primera columna que no tiene asociada ningún ión y su unidad de medida es en meq/l, las demás tienen como unidad de medida mg/l.

El orden de las columnas es el siguiente:

Columna 1: sin ión, unidad de medida meq/l

Columna 2: Ca, unidad de medida mg/l

Columna 3: Mg, unidad de medida mg/l

Columna 4: Na, unidad de medida mg/l

Columna 5: Cl, unidad de medida mg/l

Columna 6: SO₄, unidad de medida mg/l

Columna 7: HCO₃, unidad de medida mg/l

Columna 8: NO₃, unidad de medida mg/l

La columna núm. 1 puede estar dividida de 0,1 hasta 1 000 (meq/l), y las demás se deben configurar y colocar de tal manera que el peso del equivalente de cada ion coincida con el 1 de la primera columna, cuya escala es en meq/l (esto hace que las divisiones queden desplazadas). El peso equivalente de los iones anteriores es:

Figura 15. **Peso de un meq de cada parámetro**

Columna	Parámetro	peso de un meq (mg)
2	Ca ⁺²	20
3	Mg ⁺²	12,15
4	K ⁺	23
5	Cl ⁻	35,5
6	SO ₄ ⁻²	48
7	HCO ₃ ⁻	61
8	NO ₃ ⁻	62

Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*
<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

Configuración del diagrama de Schoeller

Como ejemplo se grafican los datos de la muestra del diagrama de Piper anterior tal como se consigna en la siguiente tabla:

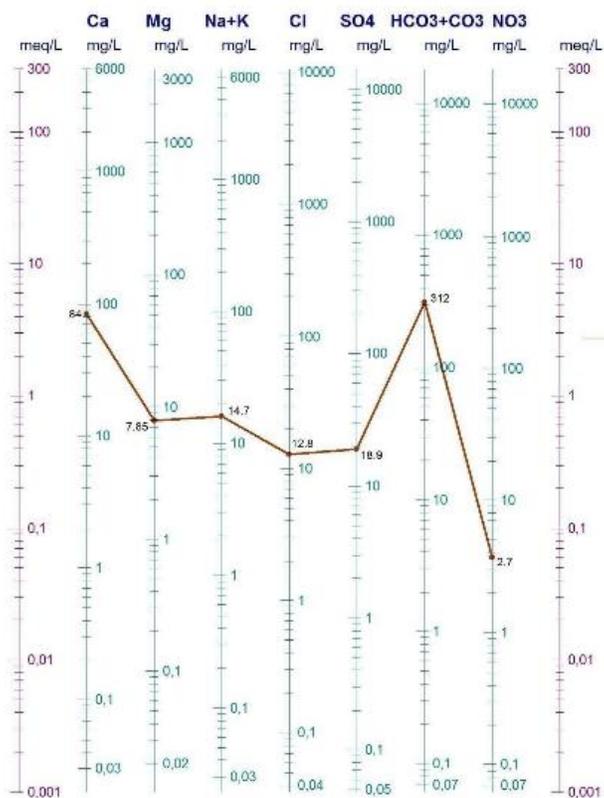
Figura 16. **Datos diagrama de Schoeller**

Parámetro	Concentración (mg/l)
Ca ⁺²	84
Mg ⁺²	7,85
K ⁺	14,7
Cl ⁻	12,8
SO ₄ ⁻²	18,9
HCO ₃ ⁻	312
NO ₃ ⁻	2,7

Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*
<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

Colocamos estos valores en cada una de las columnas correspondientes y luego unimos cada punto con una línea continua, el resultado se muestra en la siguiente gráfica.

Figura 17. **Gráfico de una muestra de agua en Schoeller**



Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*

<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

2.16.4. Utilidad del diagrama de Schoeller- Barkalof

- Se pueden representar tanto aguas diluidas como concentradas en un mismo diagrama.
- Permite clasificar los diferentes tipos de agua.
- En una misma línea de flujo permite establecer la evolución del agua en el acuífero, así como determinar los procesos modificatorios, como intercambio iónico, procesos de óxido reducción y mezcla de diferentes tipos de agua.
- Es muy útil para estudiar la evolución temporal de aguas subterráneas en un mismo punto.

2.16.5. Diagrama de Gibbs (boomerang)

En el diagrama de Gibbs es graficada la concentración de los sólidos disueltos totales (eje y) en función de la relación:

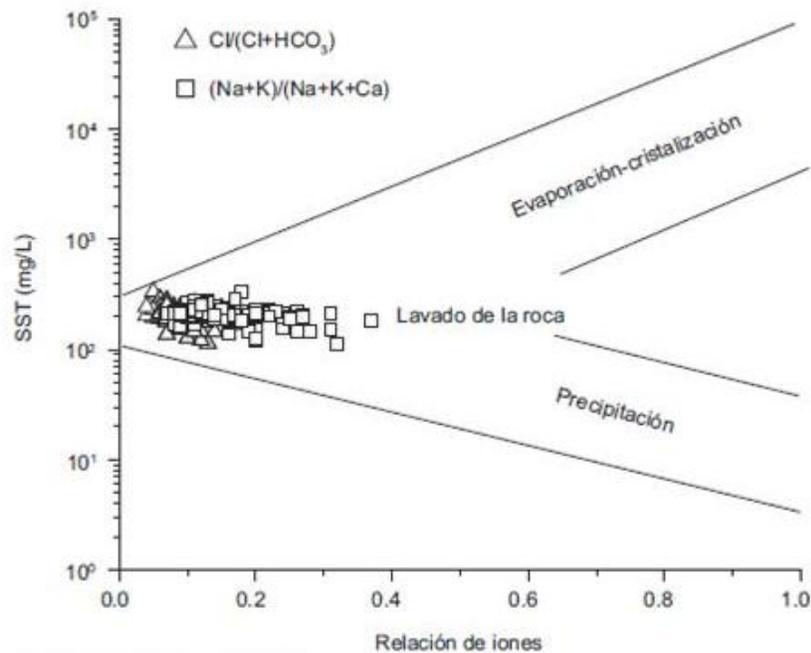
$$\frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{+2}} \text{ ó } \frac{\text{Cl}^-}{\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-}$$

Se caracteriza por poseer tres zonas asociadas a los procesos de evaporación, interacción agua-roca y precipitación atmosférica.

Este diagrama se aplica con más frecuencia a las aguas superficiales. De acuerdo al autor Langmuir, en el año 1979, citando al autor Gibbs, del año de 1970, la química de aguas superficiales está determinada por tres factores: lluvia (en el dominio de precipitación); reacciones de intemperismo (dominio de Roca); y el dominio de evaporación-cristalización.

La composición de la lluvia mundial está determinada por el contenido de NaCl de origen marino y bajas concentraciones de sólidos disueltos, por lo que se encuentran en la esquina inferior derecha. El incremento de sales debido a la interacción agua-roca causado por intemperismo aumenta la proporción de sólidos disueltos que afectan las concentraciones de Calcio o Bicarbonato relativas a Sodio y Cloruros. Finalmente, la evapotranspiración, como sucede en áreas de cultivo o superficies con suficiente aridez que reciben escurrimiento subsuperficial por aguas de retorno agrícola, elevan el contenido de Na⁺ y de sólidos disueltos TDS. En la figura siguiente se muestra el diagrama de Gibbs.

Figura 18. **Diagrama de Gibbs**



Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*
<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

2.16.6. Diagramas binarios

Se utilizan para representar la variación de un parámetro con respecto a otro.

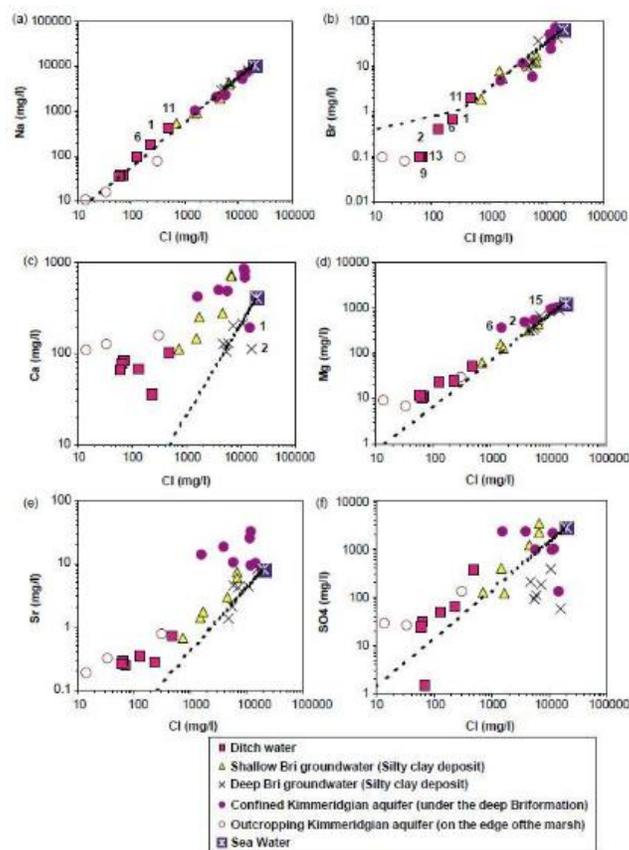
En ocasiones, permiten visualizar la variación de varios parámetros con respecto a otro. Como por ejemplo, el Ca, Na, K, Mg, HCO₃, Br, SO₄ comparados con el Cl. Estos gráficos en conjunto permiten visualizar los efectos de interacción agua roca, mezcla de diferentes tipos de agua (agua dulce - agua de mar). Para comprender mejor este tema veamos un ejemplo extraído de *Journal of Hydrology*, según los autores B. Ladouche y P. Weng, en el año 2005, que se muestra en la gráfica siguiente.

La correlación de las concentraciones de Na y Ba con Cl coincide con la línea de dilución teórica del agua de mar (a, b de la figura) que confirma fuertemente la influencia del agua marina en la composición química de las aguas del acuífero.

La correlación entre la concentración de Ca y Cl (a) indica que el agua subterránea de la formación Bri profunda (deep Bri groundwater) está sobre la línea de dilución del agua de mar, mientras que los puntos del agua subterránea de la formación Bri superficial (shallow Bri groundwater) muestran enriquecimiento en calcio y magnesio comparado con la línea de dilución del agua de mar (d). Los horizontes superficiales del acuífero Bri (2 m de profundidad) están enriquecidos en estroncio y los puntos correspondientes al agua subterránea de la formación Bri profunda, en su mayor parte están sobre la línea de dilución de agua de mar.

Estos resultados muestran, en primer lugar, que los efectos de interacción agua – roca, dominan la composición química de las aguas subterráneas más superficiales de la formación Bri comparados con las aguas más profundas de la misma formación. En segundo lugar, el origen de la mezcla con agua marina no se puede explicar con la composición química del agua en los depósitos de limo y arcilla de la formación Bri, según los autores B. Ladouche y P. Weng en el año 2005.

Figura 19. Diagramas binarios



Fuente: *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos.*

<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. Consulta: 14 de octubre de 2013.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Para el análisis y cuantificación de los distintos parámetros y variables con las cuales se contaron en el presente estudio, se procedió de la siguiente manera:

3.1.1. Variables independientes

- Datos de Concentraciones de Cationes y Aniones
- Línea de interfase en el fenómeno de la intrusión marina
- Tramo del cuerpo de agua (río) a evaluar

3.1.2. Variables dependientes

- Número de estaciones (puntos) de muestreo a lo largo del cuerpo de agua en el tramo por evaluar.
- Distancia entre cada estación (punto) de muestreo a lo largo del cuerpo de agua en el tramo a evaluar.

Tabla XIV. **Tabla análisis de variables**

Parámetros	Variables Independiente	Variable dependiente
Concentración de Aniones y cationes.	X	
Línea de interfase en el fenómeno de intrusión marina.	X	
Tramo del cuerpo de agua (río) a evaluar.	X	
Número de estaciones (puntos) de muestreo a lo largo del cuerpo de agua en el tramo a evaluar.		X
Distancia entre cada estación (punto) de muestreo a lo largo del cuerpo de agua en el tramo a evaluar.		X

Fuentes: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

3.2.1. Área de investigación

Este estudio enfocó su atención en el área de la ingeniería ambiental. Se basó en el estudio de la calidad del agua en el frente de intrusión marina, para determinar con base a los análisis, los usos potenciales de explotación que el cuerpo de agua evaluado presentó, sea para consumo humano, agrícola y/o industrial.

3.2.2. Campo de investigación

Este estudio enfocó su atención al campo de la calidad del agua, por medio del análisis del contenido de concentración de aniones y cationes.

Con base en el contenido iónico y la localización de los puntos de muestreo, se estableció la zona de interfase entre los dos tipos de agua (dulce y de mar), para determinar el tipo de explotación para el cual es apta.

3.2.3. Línea de investigación

Se tuvo como línea de investigación el monitoreo de la salinidad del agua. Se detectó el proceso de intercambio catiónico y la evolución iónica y la influencia que estas mismas tuvieron en el cauce del río, con base en el avance de los puntos de muestreo.

3.3. Ubicación

3.3.1. Vertiente del Pacífico

Cuenta con mayor cantidad de ríos (18 de los 38 existentes). Los ríos de la Vertiente hidrográfica del Pacífico se caracterizan por tener ríos cortos y de curso rápido.

Figura 20. Vertiente del Pacífico



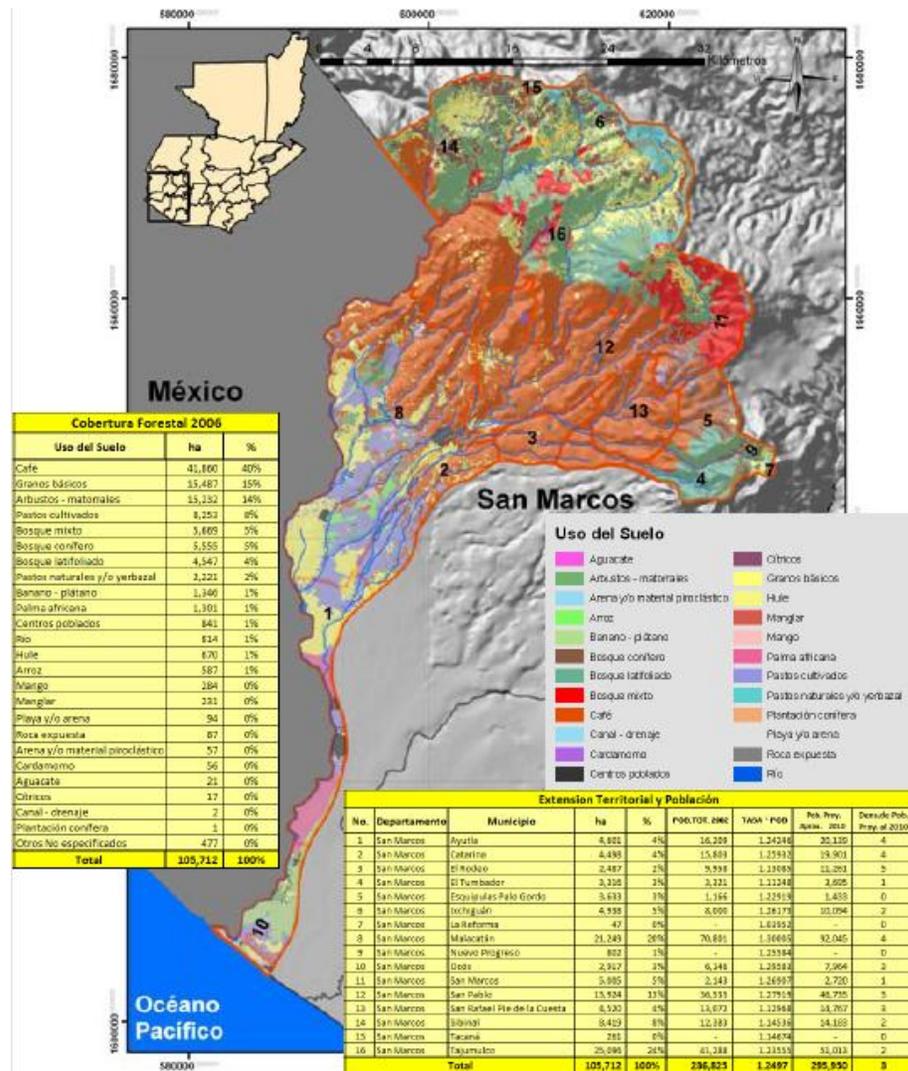
Fuente: SUAREZ, Gustavo. *Cuencas hidrográficas de Guatemala, Vertiente del Pacífico*. p.5.

Figura 21. Cuenca del río Suchiate

Cuenca río Suchiate

Cód.	Cuenca	Municipios	Departamentos	Área	% del área en la Vertiente	% del área en el País
1.02	Suchiate	16	1	105,712 ha	4 %	1 %

Vertiente	Caudal en m3/segundo	Disponibilidad Total
Pacífico	51.91 (2006)	1637 (Millones de mts ³ 2006)



Fuente: SUAREZ, Gustavo. Cuenca hidrográficas de Guatemala, Vertiente del Pacífico, Suchiate. p.7.

Figura 22. **Coordenadas ejemplo de estación de toma de muestras**



Fuente: Google Maps, *Google earth*. Consulta: 11 de septiembre de 2013

3.4. Recursos humanos disponibles

Los recursos humanos con los que se contó fueron los siguientes:

- Tesista: Mario Raúl Pacay García
Estudiante de Ingeniería Ambiental
- Asesor: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
Ingeniero Químico, USAC
Colegiado núm. 685

3.5. Recursos materiales disponibles

El presente estudio se basó en el análisis del contenido de iones en relación con el fenómeno de intrusión marina. Con ese propósito, se evaluó la calidad del agua para diferentes usos y se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Equipo de cómputo.
- Navegador GPS.
- Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Doctora Alba Tabarini Molina”.
- Bitácora.
- Información electrónica.
- Recipientes receptores de muestras.

3.6. Técnica cualitativa o cuantitativa

Para llevar a cabo este estudio se utilizó la técnica cuantitativa, debido a la naturaleza de las variables. Se trató de concentraciones (mg/l, meq/l, %) contenidas en las muestras de agua que se obtuvieron en las diferentes estaciones de monitoreo. Basadas en ellas se obtuvieron los datos que fueron graficados y, posteriormente, discutidos para determinar el uso potencial de la muestra analizada.

3.7. Recolección y ordenamiento de la información

Se establecieron los conceptos relacionados con la intrusión marina en un acuífero costero, para tener conocimiento de los temas más importantes que fueron tratados en el transcurso del muestreo. La recolección de datos de diferentes fuentes ayudó a enriquecer la definición.

- Los acuíferos costeros
- El fenómeno de intrusión marina
- Procesos de salinización
 - Tipología de los acuíferos
 - Kárstico
 - Detríticos
- Deltas iónicos
- Dureza del agua
- Calidad del agua
 - Parámetros de calidad
- Diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímico
 - Diagrama de Piper

3.8. Tabulación Ordenamiento de la Información

3.8.1. Procedimiento

a. Selección de estaciones de muestreo

Se establecieron ocho puntos de muestreo a lo largo del río Suchiate, desde el delta (punto de unión entre el mar y el río), hasta aproximadamente 7 kilómetros río adentro.

b. Georeferenciación de puntos

Se tomaron cuatro puntos a una distancia aproximada de 500 m. a partir de la línea costera, y los otros cuatro aproximadamente a cada 1 km, con el objeto de evaluar la variación de las concentraciones. Se georeferenciaron y se constituyeron en las estaciones de control y monitoreo para los posteriores muestreos.

c. Toma de muestras

Se procedió a la toma de muestras, las cuales fueron examinadas en el laboratorio.

d. Almacenamiento de las muestras

Se ubicaron las muestras en recipientes apropiados y se almacenaron de tal forma que no sufrieron alteraciones en sus concentraciones, y temperatura.

e. Especificación de muestreo

Rotulación de número de muestra, estación, época de muestreo.

f. Transporte.

g. Análisis de laboratorio

Se llevó a cabo el análisis de las muestras obtenidas en campo para determinar la concentración de aniones y cationes contenidos en el agua del río Suchiate.

h. Elaboración de mapas SIG

Con la obtención de los datos de coordenadas que se obtuvieron por medio del navegador GPS, se crearon mapas, en los cuales se ubicaron los puntos donde se establecieron las estaciones de monitoreo.

i. Conversión de variables

Los datos de concentraciones que se obtuvieron en el laboratorio), se presentaron en función de mg/l; así mismo, se llevó a cabo la conversión a meq/l, y %, Estos datos se utilizaron para llevar a cabo los diagramas.

j. Elaboración de diagramas

Los datos de porcentajes (%) obtenidos, se integraron en el diagrama de Piper, con el objeto de determinar el tipo de salinización presente en el agua.

k. Conclusiones

Con base en el concepto relativo al fenómeno de intrusión marina y salinización del agua, se redactaron las conclusiones relacionadas con los datos que se obtuvieron, para determinar el tipo de explotación que puede aplicársele al agua del río bajo estudio.

3.8.2. Recolección de muestras y análisis de laboratorio

Según análisis estadístico se procedió a realizar 8 muestreos por cada ión, para determinar su concentración en cada punto de control establecido en campo.

Tabla XV. **Parámetros en mg/l, por cada estación**

Muestra No. Fecha: Época:	Parámetros mg/l					
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ + Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
Estación 1						
Estación 2						
Estación 3						
Estación 4						
Estación 5						
Estación 6						
Estación 7						
Estación 8						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Parámetros en meq/l, por cada estación**

	Parámetros meq/l					
Muestra No. Fecha: Época:	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{-2}
Estación 1						
Estación 2						
Estación 3						
Estación 4						
Estación 5						
Estación 6						
Estación 7						
Estación 8						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Parámetros en %, por cada estación**

Muestra No. Fecha: Época:	Parámetros %					
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ + Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
Estación 1						
Estación 2						
Estación 3						
Estación 4						
Estación 5						
Estación 6						
Estación 7						
Estación 8						

Fuente: elaboración propia,

3.9. Plan de análisis de los resultados

3.9.1. Programas para el análisis de datos

Se georeferenciaron los puntos de obtención de las muestras en un Sistema de Información Geográfica (SIG), se tuvo un control del monitoreo de cada estación de muestreo, según coordenadas GPS.

Los datos obtenidos en el laboratorio, posteriormente, fueron graficados en un diagrama de Piper, el cual indicó el tipo de contenido y concentraciones de las muestras y se clasificaron. Se contó con los siguientes programas:

- Microsoft Word
- Microsoft Excel
- AutoCad
- ArcGis Desktop

3.10. Análisis estadístico para la determinación de puntos de muestreo

3.10.1. La distribución t

Es común, que se desconozca tanto la variancia como la media de la población. Esta situación presenta un problema respecto de la construcción de los intervalos de confianza. Por ejemplo, aun cuando la estadística presenta

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

Una distribución normal cuando la población también está distribuida en forma normal, y una distribución aproximadamente normal cuando n es grande, sin importar la forma funcional de la población, no puede utilizarse este hecho debido a que se desconoce σ . Sin embargo no está todo perdido y la solución más lógica al problema es la siguiente. Para sustituir a σ se utiliza la desviación estándar de la muestra, $s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$. Cuando el tamaño de la muestra es grande, por ejemplo mayor que 30, la confianza en s como una aproximación de σ es por lo general sustancial, por lo que se justifica la utilización de la teoría de la distribución normal para construir los intervalos de confianza de las medias de poblaciones o las diferencias entre ellas.

Cuando se tienen muestras pequeñas es imprescindible encontrar un procedimiento alternativo para construir intervalos de confianza, que por lo general se abrevia como distribución t .

La cantidad sigue esta distribución.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

La distribución t tiene las siguientes propiedades:

- Tiene una media de 0
- Es simétrica en torno a la media.
- En general, tiene una variancia mayor de 1, pero esta tiende a 1 a medida que aumenta el tamaño de la muestra.
- La variable t va de $-\infty$ a $+\infty$.

- La distribución t es en realidad una familia de distribuciones, ya que se tiene una distribución distinta para cada valor muestral n-1, el divisor utilizado para calcular s^2 .
- La distribución t se aproxima a la distribución normal a medida que n-1 se aproxima al infinito.

Tabla XVIII. **Percentiles de la distribución t**

$$p_{t_{10} \leq 2,2281} = 0,975$$

g.l.	t_{.90}	t_{.95}	t_{.975}	t_{.99}	t_{.995}
1	3,078	6,3138	12,706	31,821	63,657
2	1,886	2,92	4,3027	6,965	9,9248
3	1,638	2,3534	3,1825	4,541	5,8409
4	1,533	2,1318	2,7764	3,747	4,6041
5	1,476	2,015	2,5706	3,365	4,0321
6	1,44	1,9432	2,4469	3,143	3,7074
7	1,415	1,8946	2,3646	2,998	3,4995
8	1,397	1,8595	2,306	2,896	3,3554
9	1,383	1,8331	2,2622	2,821	3,2498
10	1,372	1,8125	2,2281	2,764	3,1693
11	1,363	1,7959	2,201	2,718	3,1058
12	1,356	1,7823	2,1788	2,681	3,0545
13	1,35	1,7709	2,1604	2,65	3,0123
14	1,3456	1,7613	2,1448	2,624	2,9768
15	1,341	1,753	2,1315	2,602	2,9467
20	1,325	1,7247	2,086	2,528	2,8453
40	1,3031	1,6973	2,0211	2,423	2,7045
60	1,2959	1,6707	2,0003	2,39	2,6603
80	1,2922	1,6641	1,9901	2,374	2,6388
100	1,2901	1,6602	1,984	2,364	2,626
120	1,2887	1,6577	1,9799	2,358	2,6175
140	1,2876	1,6577	1,9771	2,353	2,6114
160	1,2869	1,6545	1,9749	2,35	2,607

Continuación tabla XVIII

g.l.	t._{.90}	t._{.95}	t._{.975}	t._{.99}	t._{.995}
180	1,2863	1,6534	1,9733	2,347	2,6035
200	1,2858	1,6525	1,9719	2,345	2,6006
□	1,282	1,645	1,96	2,326	2,576

Fuente: WAYNE W. Daniel, *Bioestadística Base para el análisis de las ciencias de la salud*,
Tabla H. p.107.

3.10.2. Determinación del tamaño de la muestra para estimar las medidas

La pregunta de qué tan grande debe tomarse una muestra surge inmediatamente en el planteamiento de cualquier investigación o experimento. Esta es una importante pregunta y no debe tratarse con ligereza. Tomar una muestra más grande de lo necesario para lograr los resultados deseados es un desperdicio de los recursos, mientras que muestras pequeñas con frecuencia dan resultados sin uso práctico. Considérese, entonces, cómo puede procederse para determinar el tamaño de la muestra que se requiere en una determinada situación. En esta sección se presenta un método para determinar el tamaño de la muestra requerido.

Los objetivos de la estimación por intervalos son obtener intervalos estrechos con alta confiabilidad. Si se observan los componentes de un intervalo de confianza, se ve que la amplitud del intervalo está determinado por la magnitud de la cantidad.

Coeficiente de confiabilidad x error estándar

Ya que la amplitud total del intervalo es el doble de esta cantidad. Para un determinado error estándar, el aumento de confiabilidad significa un coeficiente de confiabilidad mayor. Sin embargo, un coeficiente de confiabilidad mayor, para un error estándar fijo, produce un intervalo más amplio.

Por otra parte, si se fija el coeficiente de confiabilidad, la única forma de reducir la amplitud del intervalo es reducir el error estándar. Dado que el error estándar es igual a σ / \sqrt{n} y como σ es una constante, la única forma de obtener un error estándar menor es tomar una muestra grande. ¿Qué tan grande deber ser la muestra? Esto depende del tamaño de σ , la desviación estándar de la población del grado deseado de confiabilidad y la amplitud del intervalo deseado.

Supóngase que se desea un intervalo que se extienda d unidades hacia uno u otro lado del estimador. Puede escribirse.

$$d = \text{coeficiente de confiabilidad} \times (\text{error estándar})$$

Si el muestreo va a ser con reemplazo a partir de una población infinita o a partir de una población que sea lo suficientemente grande como para poder ignorar la corrección por población finita, la ecuación anterior queda como:

$$d = z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

La cual, cuando se resuelve para n y haciendo uso de la distribución t en sustitución de la distribución normal, da

$$n \geq \frac{t^2 * \sigma^2}{d^2}$$

3.10.3. Determinación de la cantidad de estaciones (puntos) de muestreo

Sujeto de estudio: Río Suchiate

Tramo a evaluar: 6,4 kilómetros

n = número de estaciones (puntos) de muestreo

t = estadístico de t Student para un nivel de confianza específico

σ = Desviación estándar (5 %)

d = nivel de incertidumbre (~5 %), (se espera que ningún dato tenga incertidumbre >5 %)

En la tabla XIX, se buscó para 95 % de confianza y 5 grados de libertad, se encontró que:

$$t_s = 2,015$$

Se obtuvo

$$n \geq \frac{2,015^2 * 5^2}{5^2} = 4,06$$

Entonces,

$$n \geq 4$$

Para asegurar que se cumpla con el nivel deseado de confianza y la naturaleza de este estudio, se asumió arbitrariamente una $n = 8$ estaciones (puntos) de muestreo, quedando distanciadas de la siguiente forma:

$$D = \frac{L}{n}$$

Donde:

D = Distancia entre estaciones (puntos) de muestreo.

n = Número de estaciones (8)

L = Longitud o tramo del cuerpo de agua a evaluar (6.4km)

$$D = \frac{6,4}{8} = 0,8 \frac{\text{km}}{\text{punto}}$$

Con base en el análisis estadístico y la distancia por evaluar del cuerpo de agua, las estaciones o puntos de control quedaron distanciados aproximadamente a 0,8 km.

4. RESULTADOS

4.1. Establecimiento de puntos de control georeferenciados

Según el sistema de coordenadas *UTM*, Guatemala se encuentra en la transición de la zona 15 y 16, siendo nuestro interés el municipio de Ocós del departamento de San Marcos (zona 15).

Se utilizó este sistema de coordenadas para georeferenciar los puntos de control que se utilizaron como estaciones de muestreo. Se obtuvieron ocho pares de coordenadas a lo largo de aproximadamente 7 kilómetros a partir del delta a lo largo del Río Suchiate. Se establecieron puntos en los cuales se pretendió, con el presente análisis, la determinación del fenómeno de intrusión marina y la variación iónica presente en el agua en cada una de las estaciones establecidas.

4.1.1. Ubicación y Coordenadas de estaciones

Tabla XIX. **Estación 1**

Coordenadas UTM	Zona 15 P	Este	583 289
		Norte	1 606 411

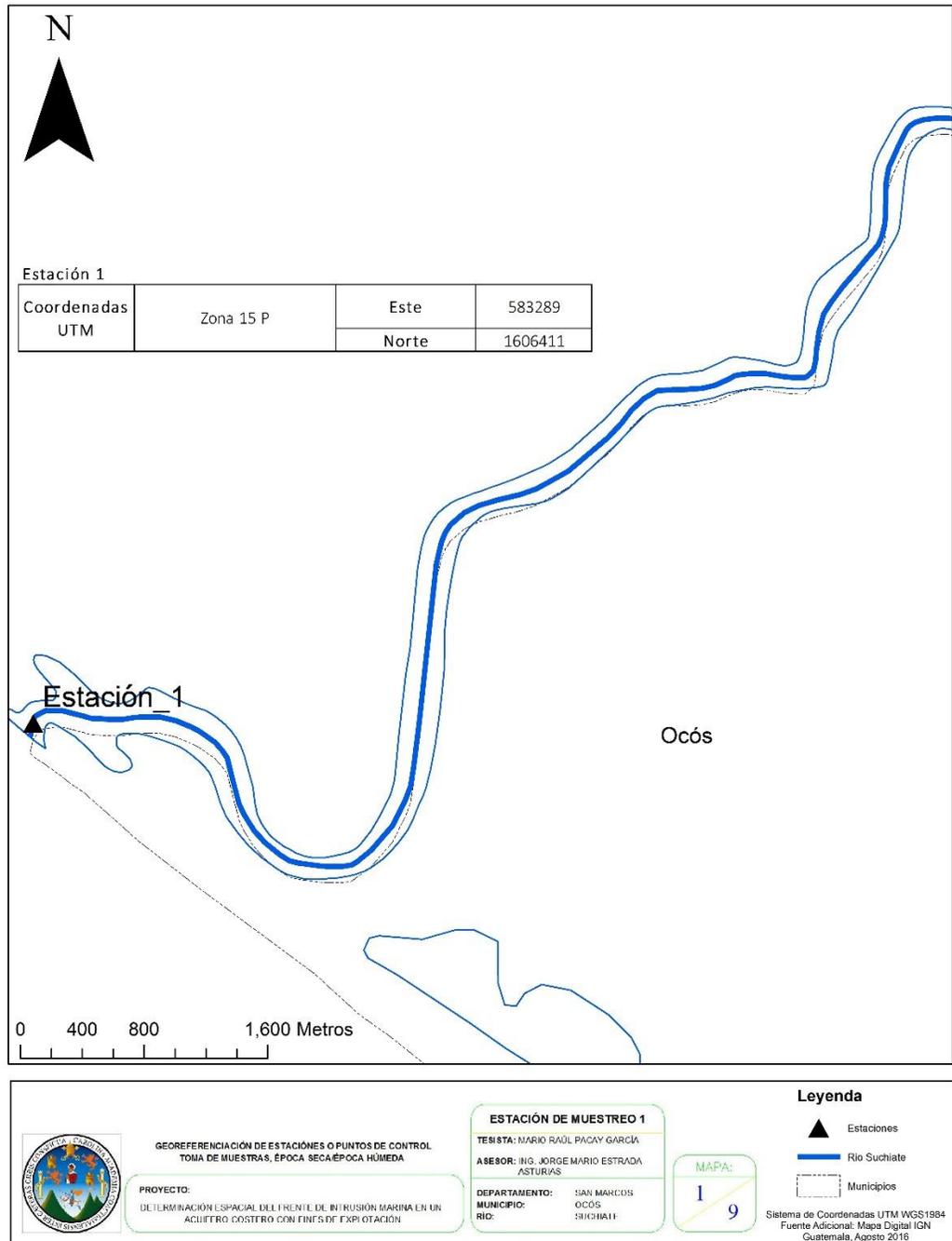
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Estación de muestreo núm. 1**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 28/07/2014 9h17min.

Figura 24. Mapa, estación de muestreo núm. 1



Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Estación 2**

Coordenadas UTM	Zona 15 P	Este	583 934
		Norte	1 606 906

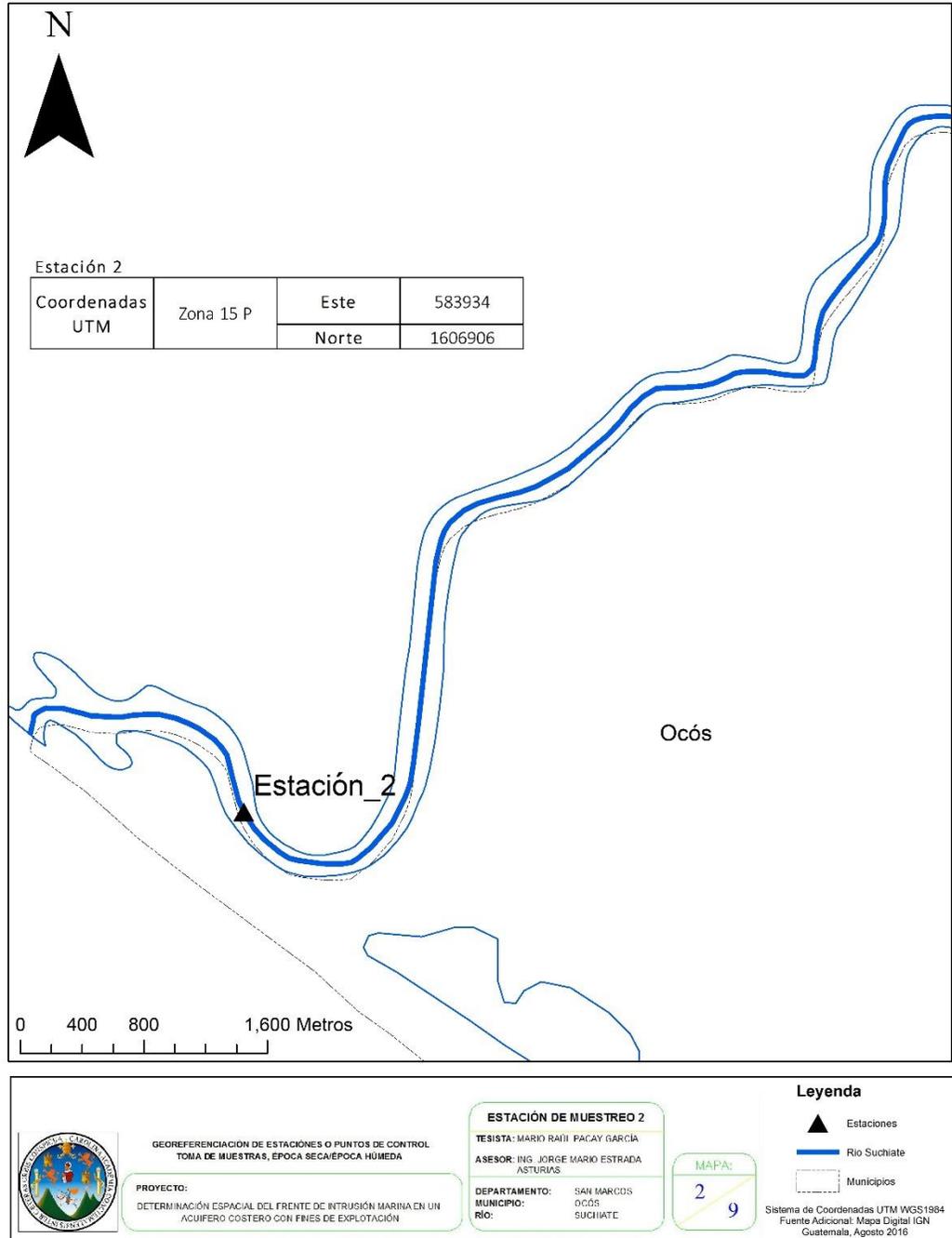
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Estación de muestreo núm. 2**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 28/07/2014 9h43min.

Figura 26. Mapa, estación de muestreo núm.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Estación 3**

Coordenadas UTM	Zona 15 P	Este	584 168
		Norte	1 607 383

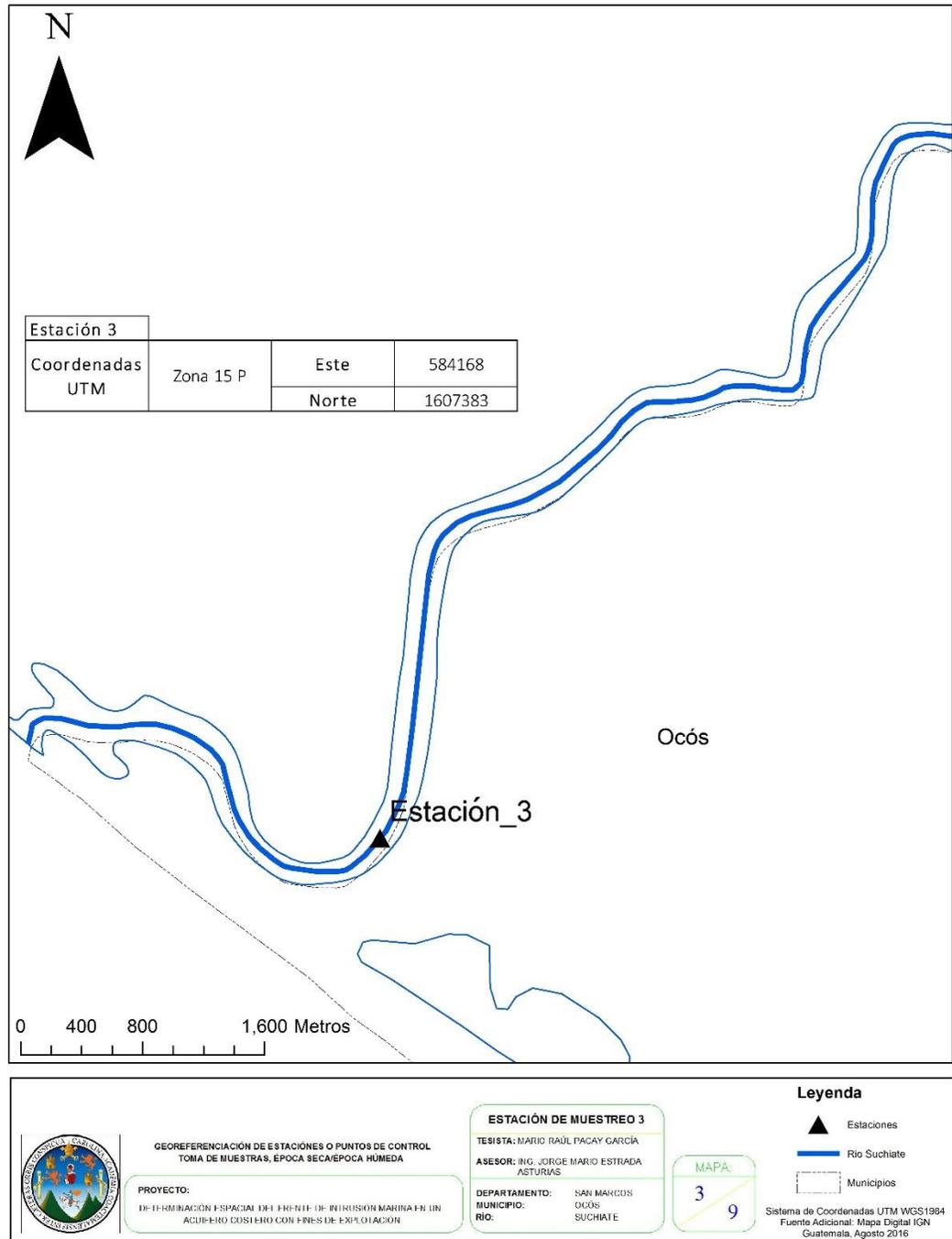
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Estación de muestreo núm. 3**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 28/07/2014 10h03min.

Figura 28. Mapa, estación de muestreo núm. 3



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Estación 4**

Coordenadas UTM	Zona 15 P	Este	584 186
		Norte	1 607 385

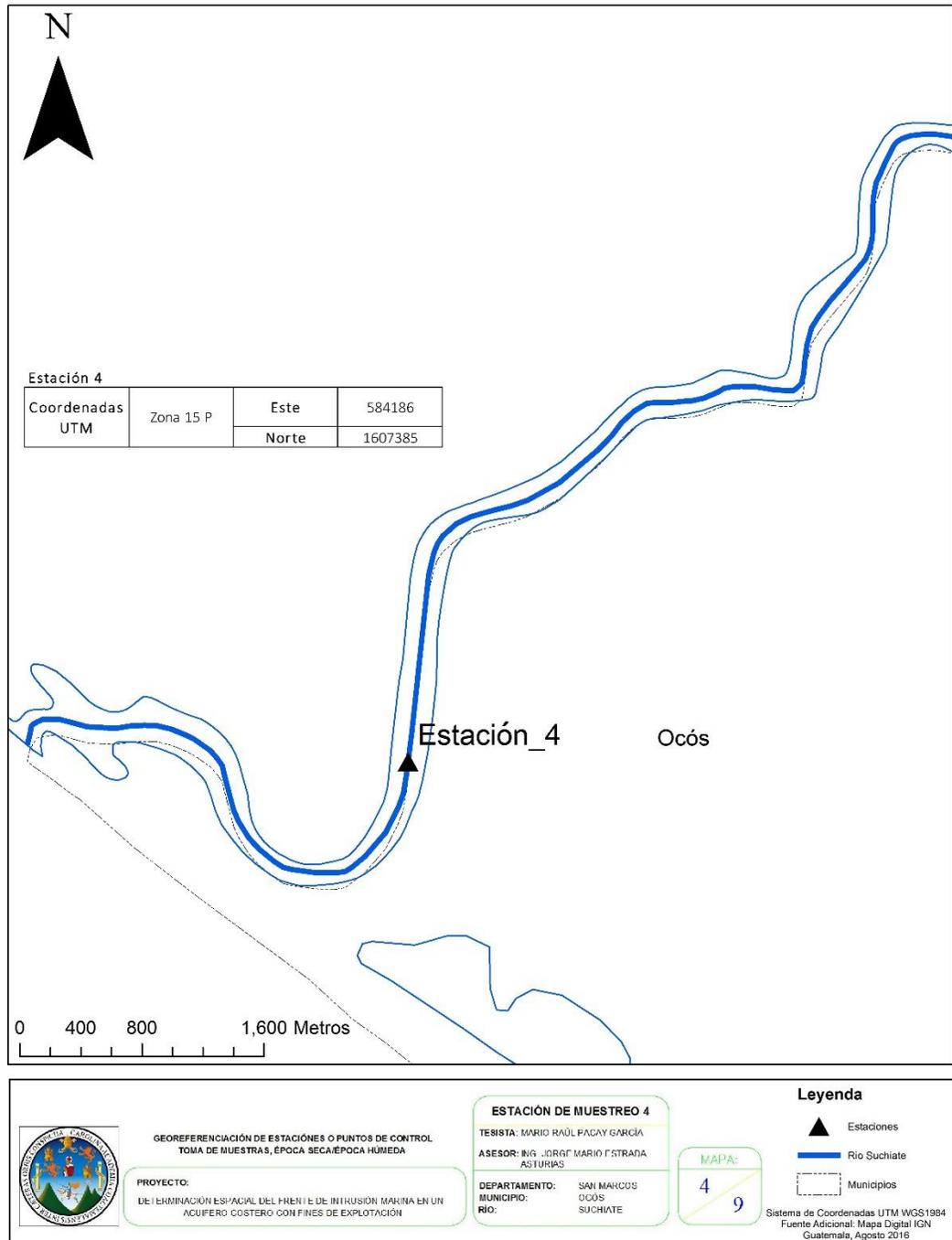
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Estación de muestreo núm. 4**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 28/07/2014 10h15min.

Figura 30. Mapa, estación de muestreo núm. 4



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Estación 5**

Coordenadas UTM	Zona 15 P	Este	584 495
		Norte	1 608 364

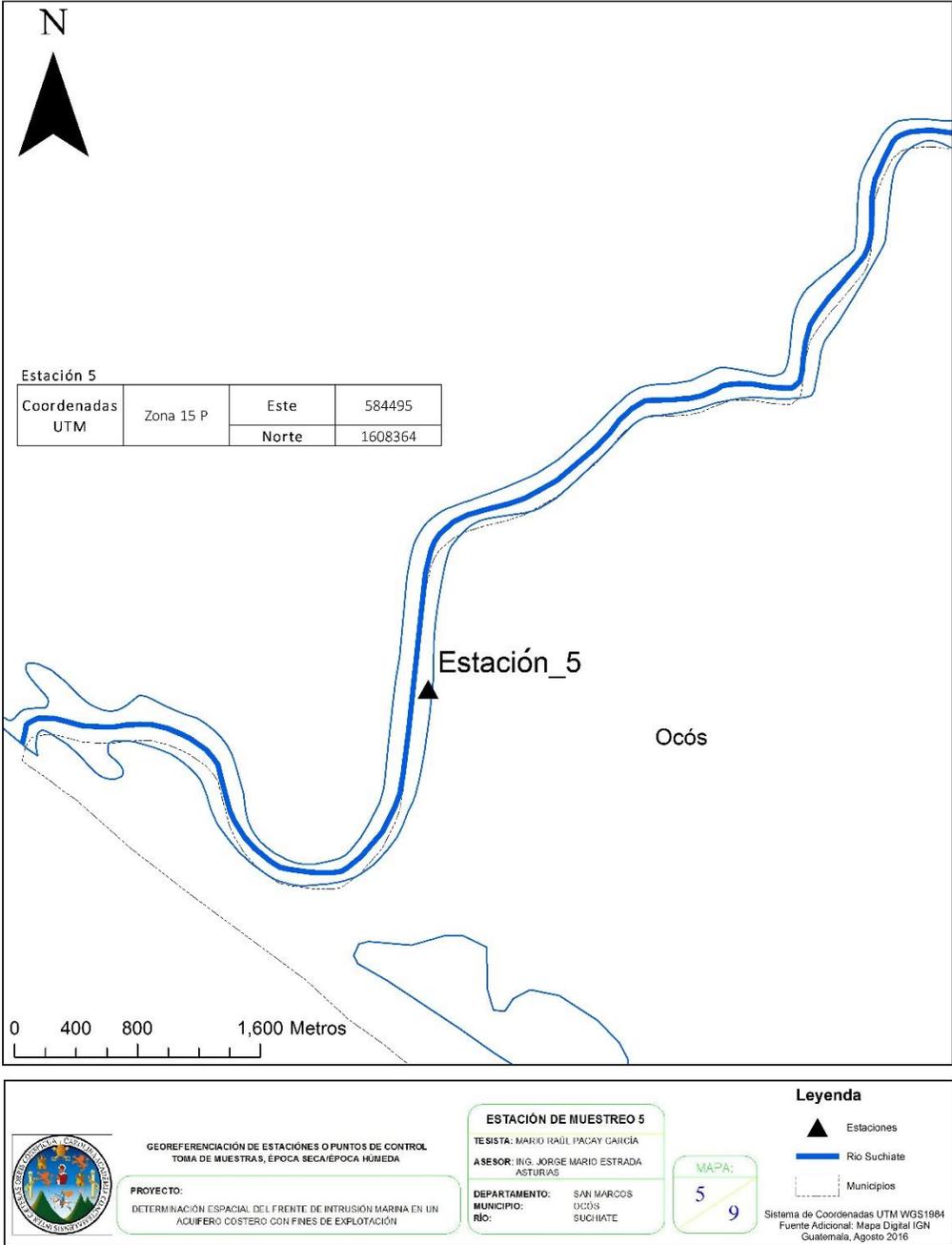
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Estación de Muestreo núm. 5**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 28/07/2014 10h36min.

Figura 32. Mapa, estación de muestreo núm. 5



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Estación 6**

Coordenadas UTM	Zona 15 P	Este	584 696
		Norte	1 609 328

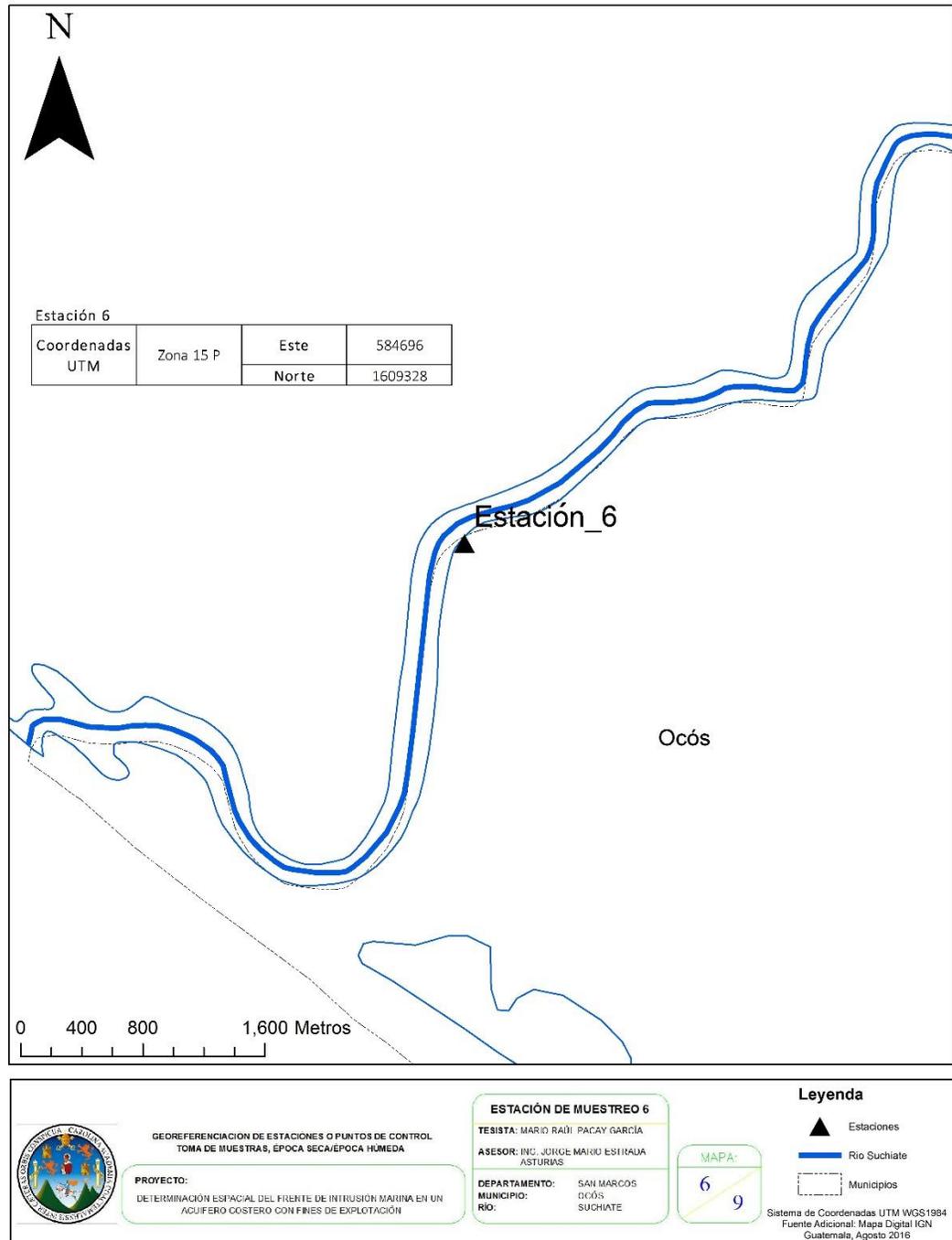
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Estación de muestreo núm. 6**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 28/07/2014 10h59min.

Figura 34. Mapa, estación de muestreo núm. 6



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Estación 7**

Coordenadas UTM	Zona 15 P	Este	585 601
		Norte	1 609 961

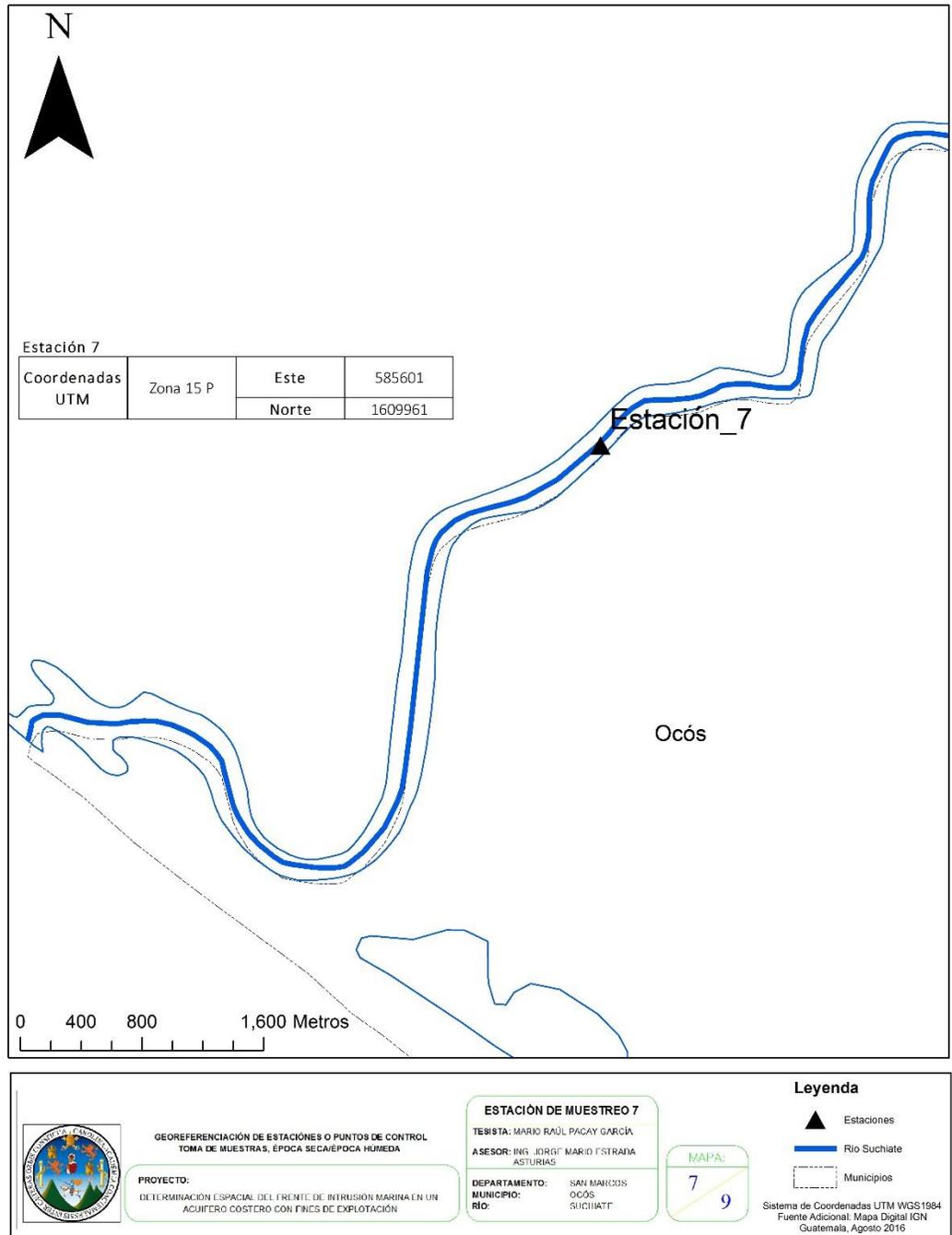
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Estación de muestreo núm. 7**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 28/07/2014 11h08min.

Figura 36. Mapa, estación de muestreo núm. 7



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Estación 8**

Coordenadas UTM	Zona 15 P	Este	587 508
		Norte	1 610 938

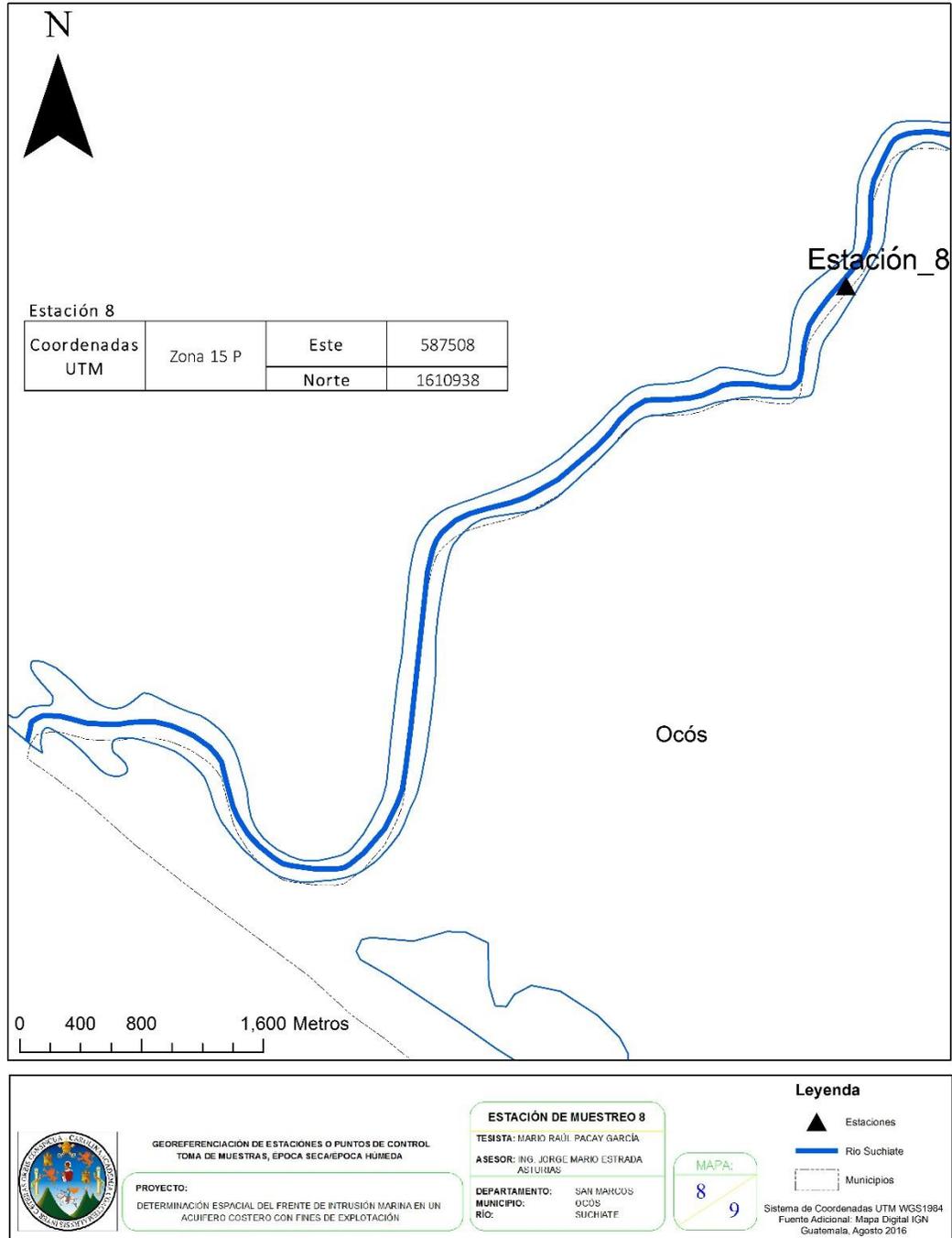
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Estación de muestreo núm. 8**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 28/07/2014 11h21min.

Figura 38. Mapa, estación de muestreo núm. 8



Fuente: elaboración propia.

4.2. Toma de muestras para laboratorio

4.2.1. Descripción de la toma de muestras

En los ríos o cursos de agua fue preciso considerar diversos factores, tales como profundidad, caudal, distancia de la orilla. La muestra se tomó lo más lejos posible de la orilla, procurando no remover el fondo y evitar los remansos o zonas de estancamiento

Para tomar una muestra de agua de un río se sujetó el frasco por el fondo en posición invertida, sumergiéndolo completamente y dándole la vuelta en sentido contrario a la corriente (río) o desplazándolo horizontalmente en la dirección de la boca del frasco.

4.2.2. Volumen

El volumen que se tomó fue el adecuado para que en una sola muestra se pudiese efectuar simultáneamente la totalidad de los análisis y estará en función de la técnica analítica utilizada. En este caso, se utilizaron 2 recipientes de ½ galón cada uno, por cada estación de muestreo, destinados a cada laboratorio que llevo a cabo los distintos análisis de determinación de iones contenidos en las muestras presentadas.

Para el análisis hidroquímico de cada muestra, se utilizó el recurso de los siguientes laboratorios:

- “Laboratorio unificado de Química y Microbiología sanitaria, Dra. Tabarini Molina”, Centro de Investigaciones de la facultad de Ingeniería USAC.

- Sección de Suelos, Laboratorios UVIGER (Unidad de Vinculación y Gestión de Recursos), Facultad de Agronomía, USAC.

4.2.3. Cerrado

Las muestras se cerraron convenientemente, de forma que quedó garantizada su inviolabilidad.

4.2.4. Rotulación

Antes de la toma de la muestra se marcó el recipiente mediante rotulador resistente al agua, con una referencia que permitió su identificación. En todo caso la muestra se acompañó de una ficha o etiqueta en la que se consignaron los datos necesarios que generalmente fueron los siguientes:

- Datos del solicitante.
- Nombre de la persona y dirección completa.
- Datos del agua.
- Origen de la muestra (pozo, manantial, grifo, cisterna río, etc.) denominación y/o referencia.
- Dirección o emplazamiento exacto, término municipal y provincia.
- Fecha y hora de la captación.
- Temperatura en el momento de la captación.

4.2.5. Otros datos

Se consignó si el agua es natural o sometida a algún tratamiento de depuración (cloro, filtración, carbón activo, etc.), identificación de la persona que ha tomado la muestra.

4.3. Análisis hidroquímico, época seca, época húmeda

4.3.1. Parámetro en mg/l

Tabla XXVII. Parámetros en mg/l, primer muestreo época seca

	Parámetros mg/l					
Muestra No. 1 Fecha: 02/02/2014 Época: Seca	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ +Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
Estación 1	52,1	24,37	1 469,82	80	11,5	138
Estación 2	18,44	10,24	47,62	62	35	19
Estación 3	28,06	16,44	15,93	60	0,08	11
Estación 4	24,05	14,01	13,4	58	65	12
Estación 5	11,22	6,23	16,32	64	6	12
Estación 6	10,42	5,71	16,71	58	6	11
Estación 7	13,63	7,64	14,18	56	7	11
Estación 8	13,63	7,61	13,79	60	5,5	11

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XXVIII. **Parámetros en mg/l, segundo muestreo época seca**

	Parámetros mg/l					
Muestra No. 2 Fecha:23/02/2014 Época: Seca	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$\text{K}^{+}+\text{Na}^{+}$	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{-2}
Estación 1	31,26	47,28	307,58	70	890	94
Estación 2	19,24	10,71	93,29	68	106,5	25
Estación 3	16,03	7,79	17,1	62	16,5	12
Estación 4	16,03	6,32	14,96	66	14,5	11
Estación 5	15,23	5,35	14,96	64	12,5	10
Estación 6	12,48	5,83	14,96	62	15	11
Estación 7	16,03	4,86	17,1	60	14	10
Estación 8	15,23	5,35	13,79	64	15	11

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XXIX. **Parámetros en mg/l, tercer muestreo época seca**

	Parámetros mg/l					
Muestra No.3 Fecha:23/03/2014 Época: Seca	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ + Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
Estación 1	23,25	29,73	238,98	64	466	47
Estación 2	23,25	19,48	82,98	120	110,5	7
Estación 3	12,83	5,84	16,64	46	13,5	11
Estación 4	14,43	4,37	7,14	54	14	11
Estación 5	12,83	4,86	6,75	50	14	11
Estación 6	12,83	4,37	6,75	52	14	11
Estación 7	12,02	4,87	7,14	52	13,5	11
Estación 8	12,83	5,83	7,14	52	13	12

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER
FAUSAC.

Tabla XXX. **Parámetros en mg/l, primer muestreo época húmeda**

	Parámetros mg/l					
Muestra No.4 Fecha:01/06/2014 Época: Húmeda	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{-2}
Estación 1	9,62	17,06	172,47	36	211,5	31
Estación 2	6,41	5,36	8,85	26	14,5	11
Estación 3	6,41	4,87	7,4	30	10,5	9
Estación 4	5,61	4,87	7,01	28	13	8
Estación 5	6,41	3,9	8,25	28	11	8
Estación 6	6,41	4,38	8,25	30	11,5	7
Estación 7	6,41	4,38	8,25	34	10,5	8
Estación 8	6,41	5,36	7,86	32	11,5	8

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XXXI. **Parámetros en mg/l, segundo muestreo época húmeda**

	Parámetros mg/l					
Muestra No.5 Fecha:13/07/2014 Época: Húmeda	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{-2}
Estación 1	16,03	12,18	310,89	52	150	25
Estación 2	12,83	10,23	56,51	56	41,5	14
Estación 3	12,83	5,84	16,82	44	10,5	8
Estación 4	11,22	5,84	21,66	46	12,5	8
Estación 5	12,02	5,84	20,1	44	13	8
Estación 6	12,83	3,88	16,59	44	13	9
Estación 7	12,02	4,38	20,88	44	11,5	9
Estación 8	11,22	8,28	20,88	44	12	10

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XXXII. **Parámetros en mg/l, tercer muestreo época húmeda**

	Parámetros mg/l					
	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{-2}
Muestra No.6 Fecha:27/07/2014 Época: Húmeda						
Estación 1	16,03	17,05	122,41	46	280	35
Estación 2	12,83	6,32	21,06	44	28	13
Estación 3	11,22	6,83	9,63	40	50	9
Estación 4	11,22	4,38	9,63	46	11,5	9
Estación 5	11,2	5,84	9,63	42	11,5	8
Estación 6	12,02	6,82	9,17	40	13	9
Estación 7	12,02	6,33	9,63	42	11,5	9
Estación 8	10,42	4,38	9,63	40	13	9

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

4.3.2. Parámetros en términos de meq/l

Se presentan los datos convertidos a meq/l

Tabla XXXIII. Parámetros en meq/l, primer muestreo época seca

	Parámetros meq/l					
Muestra No. 1 Fecha:02/02/2014 Época: Seca	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ + Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
Estación 1	2,61	2,01	62,66	1,31	35,5	48
Estación 2	0,92	0,84	1,98	1,02	0,99	0,4
Estación 3	1,4	1,35	0,63	0,98	0	0,23
Estación 4	1,2	1,15	0,52	0,95	1,83	0,25
Estación 5	0,56	0,51	0,64	1,05	0,17	0,25
Estación 6	0,52	0,47	0,65	0,95	0,17	0,23
Estación 7	0,68	0,63	0,54	0,92	0,2	0,23
Estación 8	0,68	0,63	0,53	0,98	0,15	0,23

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER
FAUSAC.

Tabla XXXIV. **Parámetros en meq/l, segundo muestreo época seca**

	Parámetros meq/l					
Muestra No. 2 Fecha:23/02/2014 Época: Seca	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{-2}
Estación 1	1,56	3,89	13,06	1,15	25,07	1,96
Estación 2	0,96	0,88	3,91	1,11	3	0,52
Estación 3	0,80	0,64	0,66	1,02	0,46	0,25
Estación 4	0,80	0,52	0,56	1,08	0,41	0,23
Estación 5	0,76	0,44	0,56	1,05	0,35	0,21
Estación 6	0,64	0,48	0,56	1,01	0,42	0,23
Estación 7	0,80	0,40	0,66	0,98	0,39	0,21
Estación 8	0,76	0,44	0,53	1,05	0,42	0,23

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XXXV. **Parámetros en meq/l, tercer muestreo época seca**

	Parámetros meq/l					
Muestra No.3 Fecha:23/03/2014 Época: Seca	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{-2}
Estación 1	1,16	2,45	10,14	1,05	13,13	0,98
Estación 2	1,16	1,6	3,42	1,97	3,11	0,15
Estación 3	0,64	0,48	0,64	0,75	0,38	0,23
Estación 4	0,72	0,36	0,22	0,89	0,39	0,23
Estación 5	0,64	0,40	0,21	0,82	0,39	0,23
Estación 6	0,64	0,36	0,21	0,85	0,39	0,23
Estación 7	0,60	0,40	0,22	0,85	0,38	0,23
Estación 8	0,64	0,48	0,22	0,85	0,37	0,25

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XXXVI. **Parámetros en meq/l, primer muestreo época húmeda**

	Parámetros meq/l					
Muestra No.4 Fecha:01/06/2014 Época: Húmeda	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{-2}
Estación 1	0,48	1,4	6,65	0,59	5,96	0,65
Estación 2	0,32	0,44	0,35	0,43	0,41	0,23
Estación 3	0,32	0,4	0,28	0,49	0,3	0,19
Estación 4	0,28	0,4	0,27	0,46	0,37	0,17
Estación 5	0,32	0,32	0,31	0,46	0,31	0,17
Estación 6	0,32	0,36	0,31	0,49	0,32	0,15
Estación 7	0,32	0,36	0,31	0,56	0,3	0,17
Estación 8	0,32	0,44	0,3	0,52	0,32	0,17

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XXXVII. **Parámetros en meq/l, segundo muestreo época húmeda**

	Parámetros meq/l					
Muestra No.5 Fecha:13/07/2014 Época: Húmeda	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{-2}
Estación 1	0,8	1	8,07	0,85	4,23	0,52
Estación 2	0,64	0,84	1,49	0,92	1,17	0,29
Estación 3	0,64	0,48	0,46	0,72	0,3	0,17
Estación 4	0,56	0,48	0,58	0,75	0,35	0,17
Estación 5	0,6	0,48	0,54	0,72	0,37	0,17
Estación 6	0,64	0,32	0,45	0,72	0,36	0,18
Estación 7	0,6	0,36	0,56	0,72	0,32	0,19
Estación 8	0,56	0,68	0,56	0,72	0,34	0,21

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XXXVIII. **Parámetros en meq/l, tercer muestreo época húmeda**

	Parámetros meq/l					
Muestra No.6 Fecha:27/07/2014 Época: Húmeda	Ca^{+2}	Mg^{+2}	$\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{-2}
Estación 1	0,8	1,4	5,19	0,75	7,89	0,73
Estación 2	0,64	0,52	0,86	0,72	0,79	0,27
Estación 3	0,56	0,56	0,37	0,66	1,41	0,19
Estación 4	0,56	0,36	0,37	0,75	0,32	0,19
Estación 5	0,56	0,48	0,37	0,69	0,32	0,17
Estación 6	0,6	0,56	0,35	0,66	0,37	0,19
Estación 7	0,6	0,52	0,37	0,69	0,32	0,19
Estación 8	0,52	0,36	0,37	0,66	0,37	0,19

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

4.3.3. Parámetros en términos de %meq/l

A continuación se presentan los datos de meq/l en valores de porcentaje.

Tabla XXXIX. Parámetros en %meq/l, primer muestreo época seca

	Parámetros %					
	Aniones=100%			Cationes=100%		
Muestra No. 1 Fecha:02/02/2014 Época: Seca	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ + Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
Estación 1	3,87	2,98	93,13	29,08	7,18	63,74
Estación 2	24,62	22,51	52,87	42,38	41,11	16,51
Estación 3	41,43	39,96	18,61	80,95	0,19	18,86
Estación 4	41,82	40,1	18,08	31,36	60,39	8,25
Estación 5	32,74	29,92	37,25	71,46	11,51	17,03
Estación 6	31,75	28,64	39,61	70,48	12,53	16,99
Estación 7	36,83	33,98	29,18	68,29	14,67	17,05
Estación 8	37,08	34,08	28,84	71,920	11,33	16,76

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XL. **Parámetros en %meq/l, segundo muestreo época seca**

	Parámetros %					
	Aniones=100%			Cationes=100%		
Muestra No. 2 Fecha:23/02/2014 Época: Seca	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ + Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
Estación 1	8,44	21,02	70,54	4,07	88,8	6,95
Estación 2	16,72	15,32	67,96	24,05	64,72	11,24
Estación 3	38,12	30,49	31,39	58,71	26,85	14,44
Estación 4	42,60	27,64	29,76	62,92	23,75	13,33
Estación 5	43,22	24,99	31,79	65,18	21,88	12,94
Estación 6	38,17	28,53	33,3	60,93	25,33	13,74
Estación 7	43,06	21,49	35,46	62,01	24,86	13,13
Estación 8	43,97	25,43	30,6	61,68	24,84	13,47

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XLI. **Parámetros en %meq/l, tercer muestreo época seca**

	Parámetros %					
	Aniones=100%			Cationes=100%		
Muestra No.3 Fecha:23/03/2014 Época: Seca	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ + Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
Estación 1	8,45	17,80	73,75	6,92	86,62	6,46
Estación 2	18,79	25,92	55,28	37,64	59,56	2,79
Estación 3	36,40	27,28	36,32	55,30	27,89	16,81
Estación 4	55,45	27,64	16,91	58,67	26,14	15,19
Estación 5	51,26	31,96	16,78	56,80	27,33	15,88
Estación 6	52,97	29,70	17,34	57,75	26,72	15,53
Estación 7	49,19	32,81	18,01	58,31	26,01	15,68
Estación 8	47,83	35,77	13,4	58,04	24,93	17,02

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XLII. **Parámetros en %meq/l, primer muestreo época húmeda**

	Parámetros %					
	Aniones=100%			Cationes=100%		
Muestra No.4 Fecha:01/06/2014 Época: Húmeda	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ + Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
Estación 1	5,64	16,45	77,91	8,20	82,82	8,98
Estación 2	28,83	39,68	31,49	40,06	38,39	21,54
Estación 3	32,01	40,03	27,96	50,44	30,33	19,23
Estación 4	29,49	42,13	28,39	46,28	36,92	16,80
Estación 5	33,68	33,74	32,58	49,06	33,12	17,81
Estación 6	32,34	36,38	31,28	51,15	33,69	15,17
Estación 7	32,34	36,38	31,28	54,65	29	16,34
Estación 8	30,19	41,55	28,26	51,67	31,91	16,42

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

Tabla XLIII. **Parámetros en %meq/l, segundo muestreo época húmeda**

	Parámetros %					
	Aniones=100%			Cationes=100%		
Muestra No.5 Fecha:13/07/2014 Época: Húmeda	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ + Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
Estación 1	8,12	10,15	81,73	15,23	75,47	9,30
Estación 2	21,57	28,32	50,11	38,59	49,14	12,26
Estación 3	40,55	30,38	29,07	60,93	24,99	14,08
Estación 4	34,59	29,64	35,77	59,24	27,66	13,09
Estación 5	37,06	29,64	33,3	57,51	29,20	13,29
Estación 6	45,47	22,63	31,89	56,57	28,72	14,71
Estación 7	39,50	23,69	36,8	58,51	26,28	15,21
Estación 8	31,12	37,81	31,07	56,90	26,67	16,43

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER
FAUSAC.

Tabla XLIV. **Parámetros en %meq/l, tercer muestreo época húmeda**

	Parámetros %					
	Aniones=100%			Cationes=100%		
Muestra No.6 Fecha:27/07/2014 Época: Húmeda	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺ + Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
Estación 1	10,84	18,98	70,19	8,05	84,17	7,78
Estación 2	31,73	25,73	42,54	40,50	44,29	15,21
Estación 3	37,57	37,65	24,78	29,12	62,55	8,33
Estación 4	43,44	27,91	28,65	59,59	25,60	14,82
Estación 5	39,70	34,07	26,23	58,39	27,47	14,13
Estación 6	39,74	37,12	23,14	54,22	30,28	15,50
Estación 7	40,28	34,91	24,8	57,38	27	15,63
Estación 8	41,63	28,81	29,56	54,22	30,28	15,50

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por CII FIUSAC/ UVIGER FAUSAC.

4.3.4. Conversión de mg/l a meq/l

4.3.4.1. Primera fase de muestreos

Conocido el peso de un meq para cada parámetro que en este caso se evaluaron: calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), sodio (Na^+) y potasio (K^+).

Tabla XLV. Estación núm. 1 Cationes, mg/l-meq/l

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l
Ca^{+2}	52,1	20	2,61
Mg^{+2}	24,37	12,15	2,01
Na^+	1 400,01	23	60,87
K^+	69,81	39	1,79
		Suma	67,27

Fuente: elaboración propia.

$$\text{Ca}^{+2} = \frac{52,1\text{mg/l}}{20\text{meq}} = 2,61\text{meq/l}$$

$$\text{Mg}^{+2} = \frac{24,37}{12,15} = 2,01 \text{ meq/l}$$

$$\text{Na}^+ + \text{K}^+ = \frac{1\,400,01 + 69,81}{23 + 39} = 62,66 \text{ meq/l}$$

Nota: se llevó a cabo la misma relación para los datos de cationes para la determinación de meq/l.

4.3.5. Concentraciones en % meq/l para distintas etapas de muestreo

Primera fase de muestreos

Tabla XLVI. Estación núm. 1 aniones, meq/l-%meq/l

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	52,1	20	2,61	3,87
Mg ⁺²	24,37	12,15	2,01	2,98
Na ⁺	1 400,01	23	60,87	90,49
K ⁺	69,81	39	1,79	2,66
		Suma	67,27	100,00

Fuente: elaboración propia.

Conocida la sumatoria total de la concentración en meq/l, se procedió a determinar el porcentaje de cada uno de los parámetros y se llevó a cabo el mismo procedimiento para cationes.

$$\text{Ca}^{+2} = \frac{2,61}{67,27} * 100 = 3,87 \%$$

$$\text{Mg}^{+2} = \frac{2,01}{67,27} * 100 = 2,98 \%$$

$$\text{Na}^{+} + \text{K}^{+} = \frac{60,87 + 1,79}{67,27} * 100 = 93,15 \%$$

4.4. Variación de % de concentración de iones según puntos de control

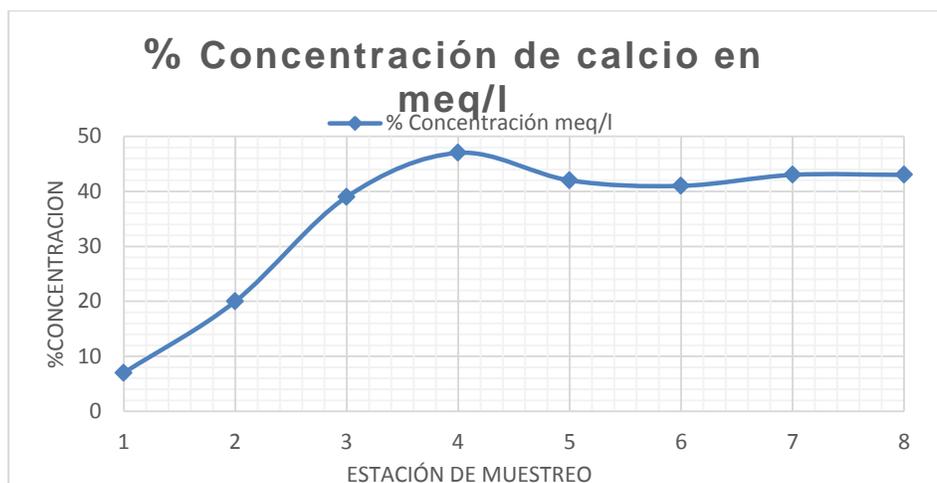
4.4.1. Estación seca

Tabla XLVII. Estación seca parámetro: calcio

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	7
Estación 2	20
Estación 3	39
Estación 4	47
Estación 5	42
Estación 6	41
Estación 7	43
Estación 8	43

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Estación seca, calcio



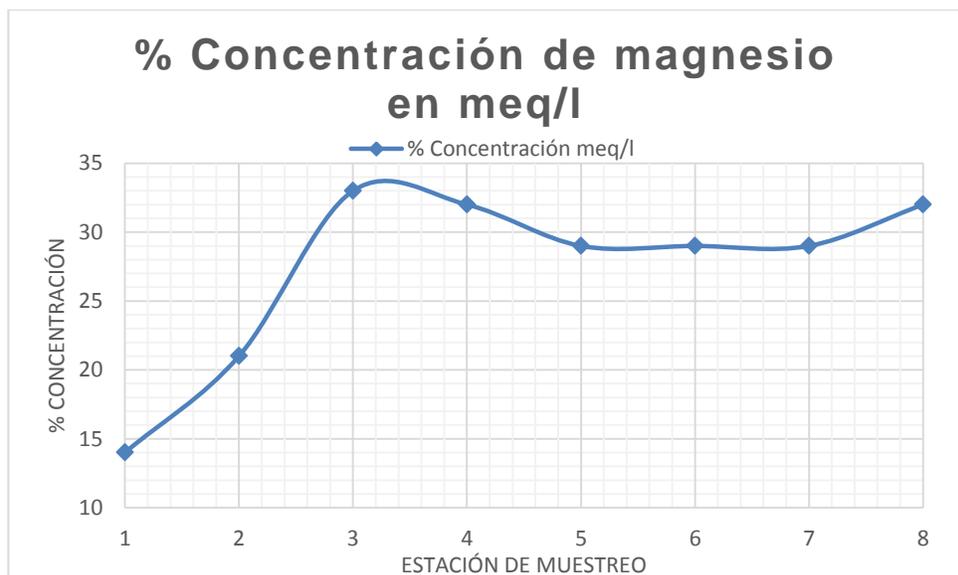
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. Estación seca parámetro: magnesio

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	14
Estación 2	21
Estación 3	33
Estación 4	32
Estación 5	29
Estación 6	29
Estación 7	29
Estación 8	32

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. Estación seca, magnesio



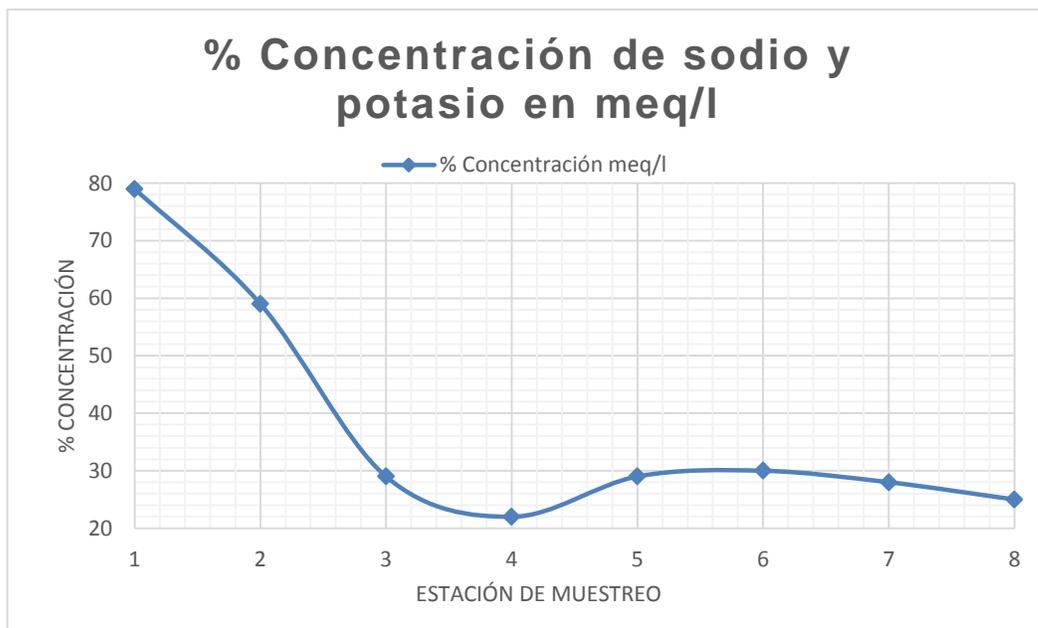
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. Estación seca parámetro: sodio y potasio

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	79
Estación 2	59
Estación 3	29
Estación 4	22
Estación 5	29
Estación 6	30
Estación 7	28
Estación 8	25

Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Estación seca, sodio y potasio



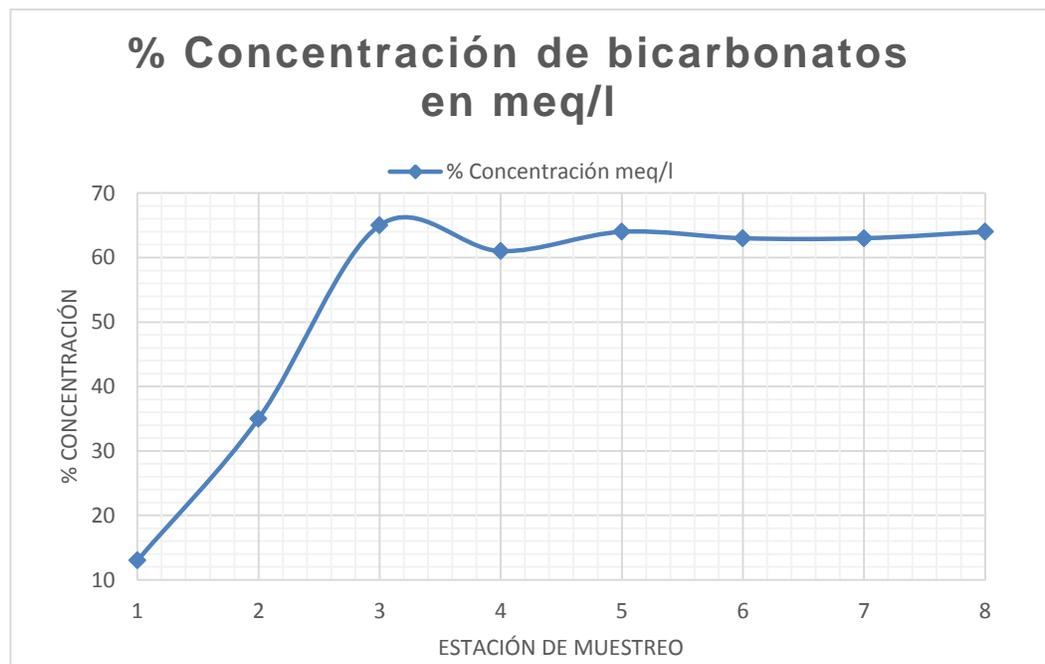
Fuente: elaboración propia.

Tabla L. Estación seca parámetro: bicarbonatos

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	13
Estación 2	35
Estación 3	65
Estación 4	61
Estación 5	64
Estación 6	63
Estación 7	63
Estación 8	64

Fuente: elaboración propia.

Figura 42. Estación seca, bicarbonatos



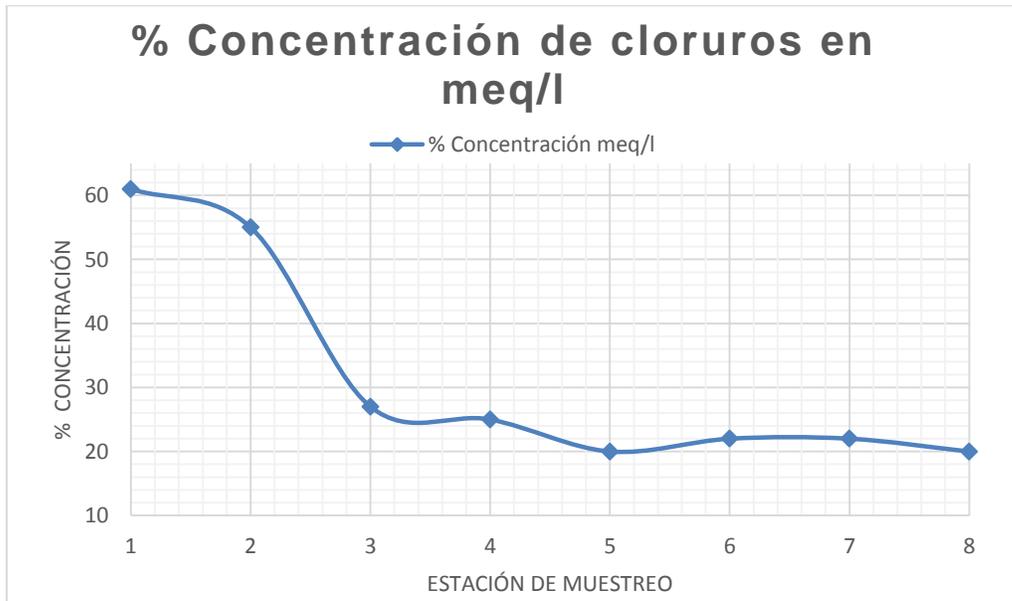
Fuente: elaboración propia

Tabla LI. Estación seca parámetro: cloruros

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	61
Estación 2	55
Estación 3	27
Estación 4	25
Estación 5	20
Estación 6	22
Estación 7	22
Estación 8	20

Fuente: elaboración propia.

Figura 43. Estación seca, cloruros



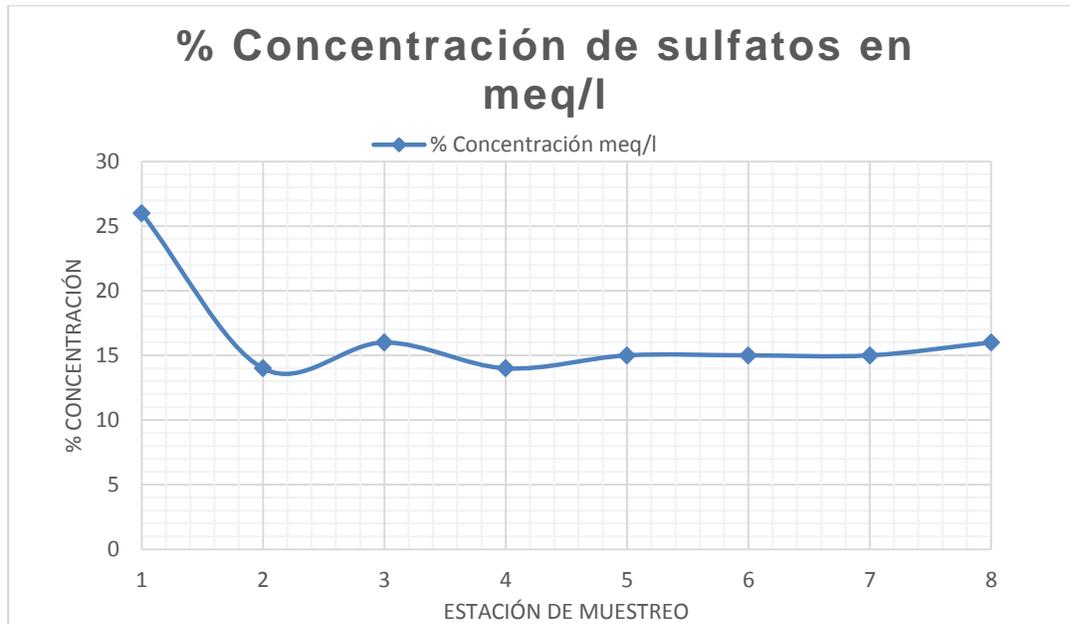
Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. Estación seca parámetro: sulfatos

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	26
Estación 2	14
Estación 3	16
Estación 4	14
Estación 5	15
Estación 6	15
Estación 7	15
Estación 8	16

Fuente: elaboración propia.

Figura 44. Estación seca, sulfatos



Fuente: elaboración propia.

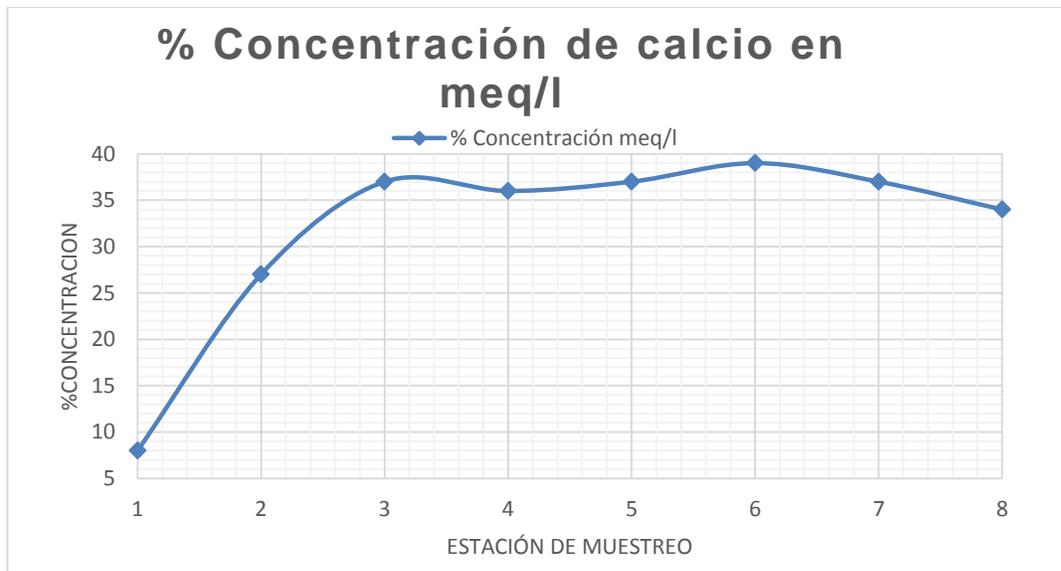
4.4.2. Estación húmeda

Tabla LIII. Estación húmeda parámetro: calcio

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	8
Estación 2	27
Estación 3	37
Estación 4	36
Estación 5	37
Estación 6	39
Estación 7	37
Estación 8	34

Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Estación húmeda, calcio



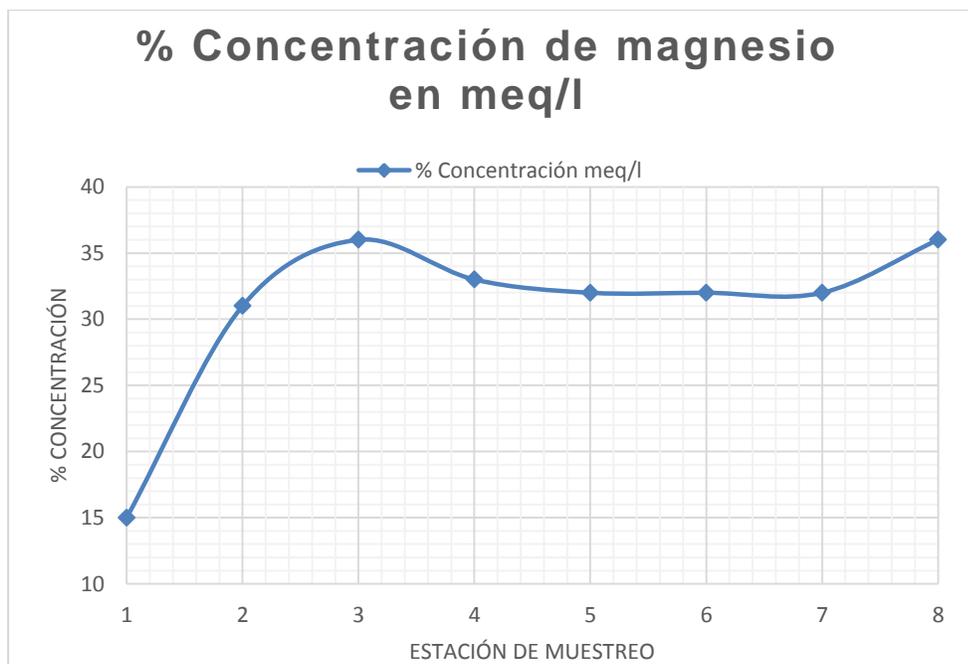
Fuente: elaboración propia.

Tabla LIV. Estación húmeda parámetro: magnesio

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	15
Estación 2	31
Estación 3	36
Estación 4	33
Estación 5	32
Estación 6	32
Estación 7	32
Estación 8	36

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Estación húmeda, magnesio



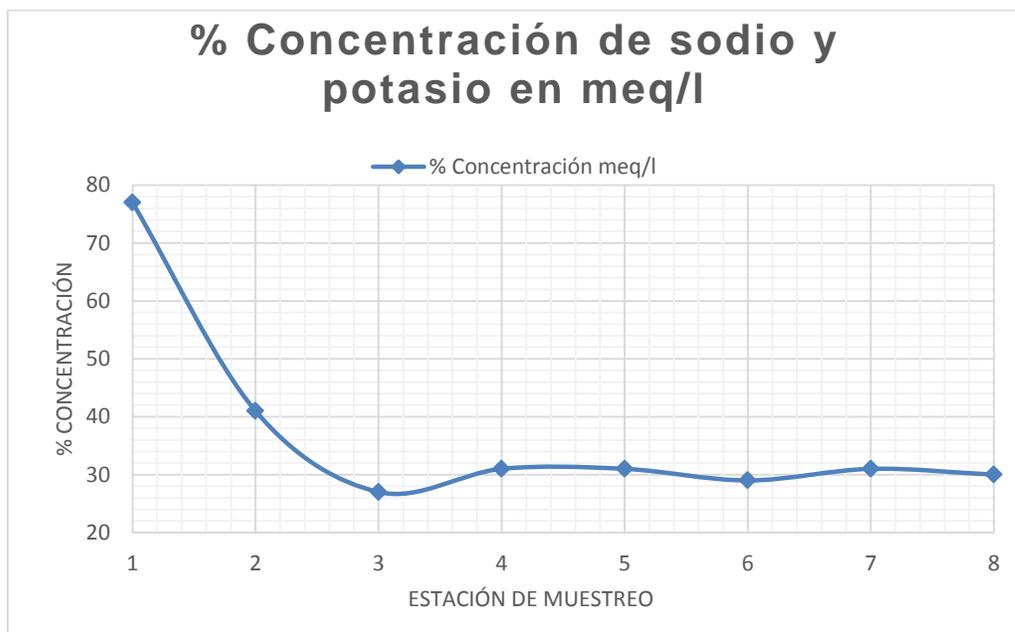
Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. Estación húmeda parámetro: sodio y potasio

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	77
Estación 2	41
Estación 3	27
Estación 4	31
Estación 5	31
Estación 6	29
Estación 7	31
Estación 8	30

Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Estación húmeda, sodio y potasio



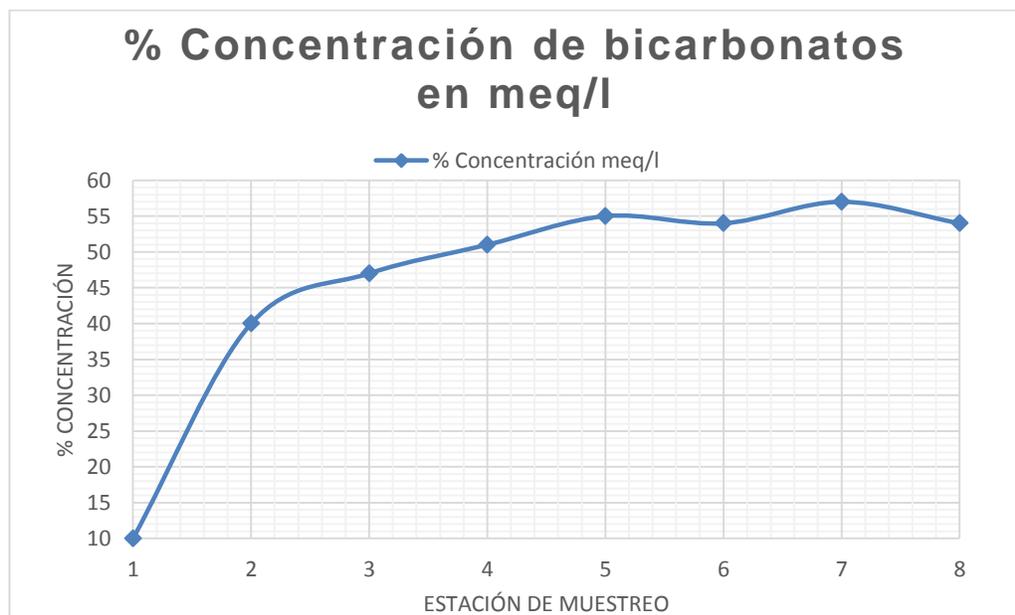
Fuente: elaboración propia.

Tabla LVI. **Estación húmeda parámetro: bicarbonatos**

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	10
Estación 2	40
Estación 3	47
Estación 4	51
Estación 5	55
Estación 6	54
Estación 7	57
Estación 8	54

Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Estación húmeda, bicarbonatos**



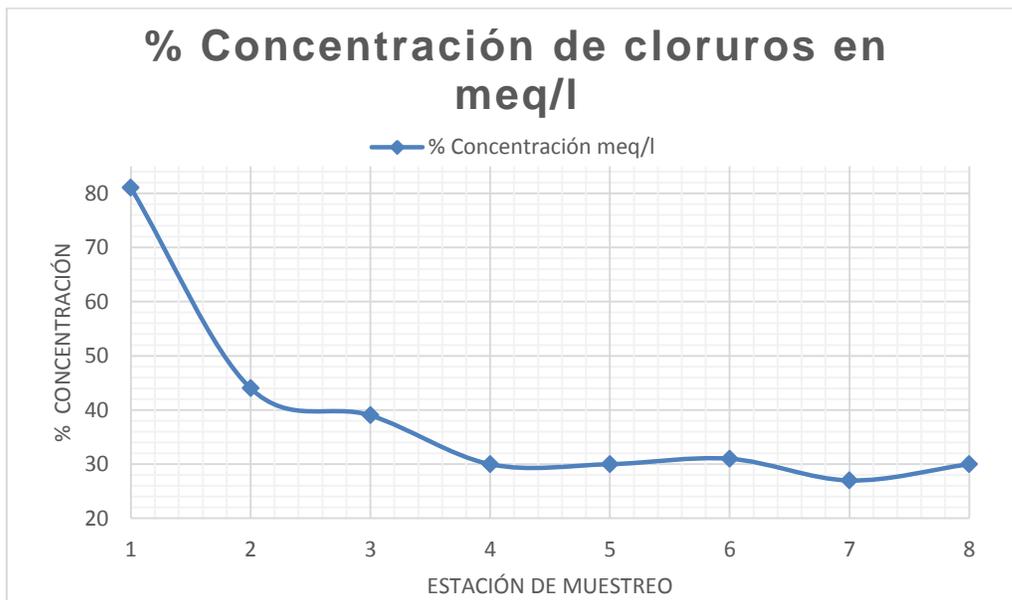
Fuente: elaboración propia.

Tabla LVII. Estación húmeda parámetro: cloruros

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	81
Estación 2	44
Estación 3	39
Estación 4	30
Estación 5	30
Estación 6	31
Estación 7	27
Estación 8	30

Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Estación húmeda, cloruros



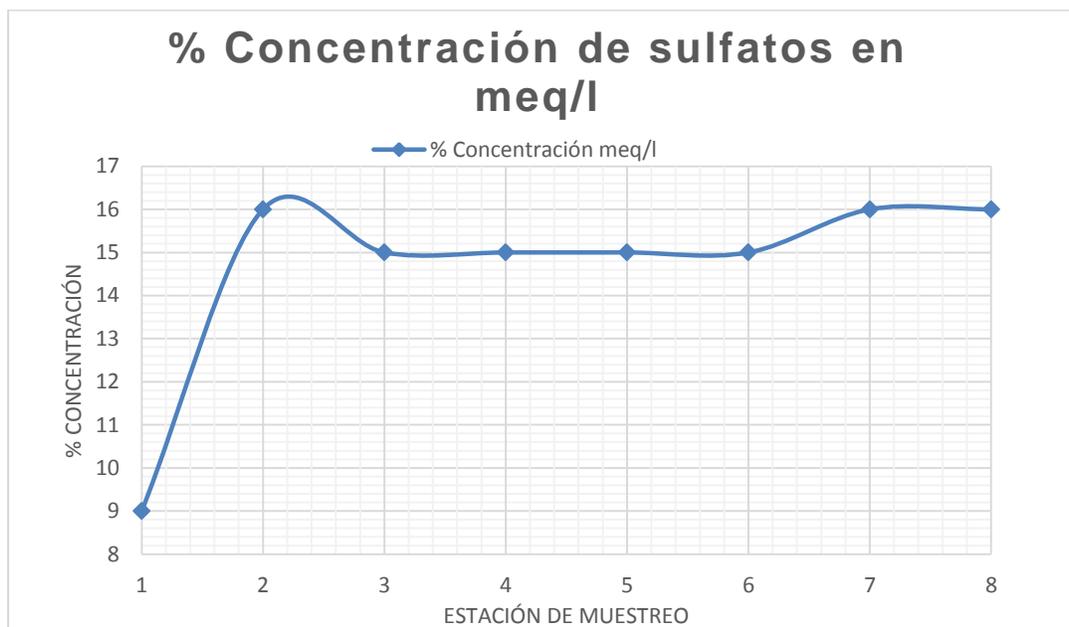
Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. Estación húmeda parámetro: sulfatos

Estación	% Concentración meq/l
Estación 1	9
Estación 2	16
Estación 3	15
Estación 4	15
Estación 5	15
Estación 6	15
Estación 7	16
Estación 8	16

Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Estación húmeda, sulfatos



Fuente: elaboración propia.

4.5. Diagrama de Piper, establecimiento de fenómeno de intrusión marina

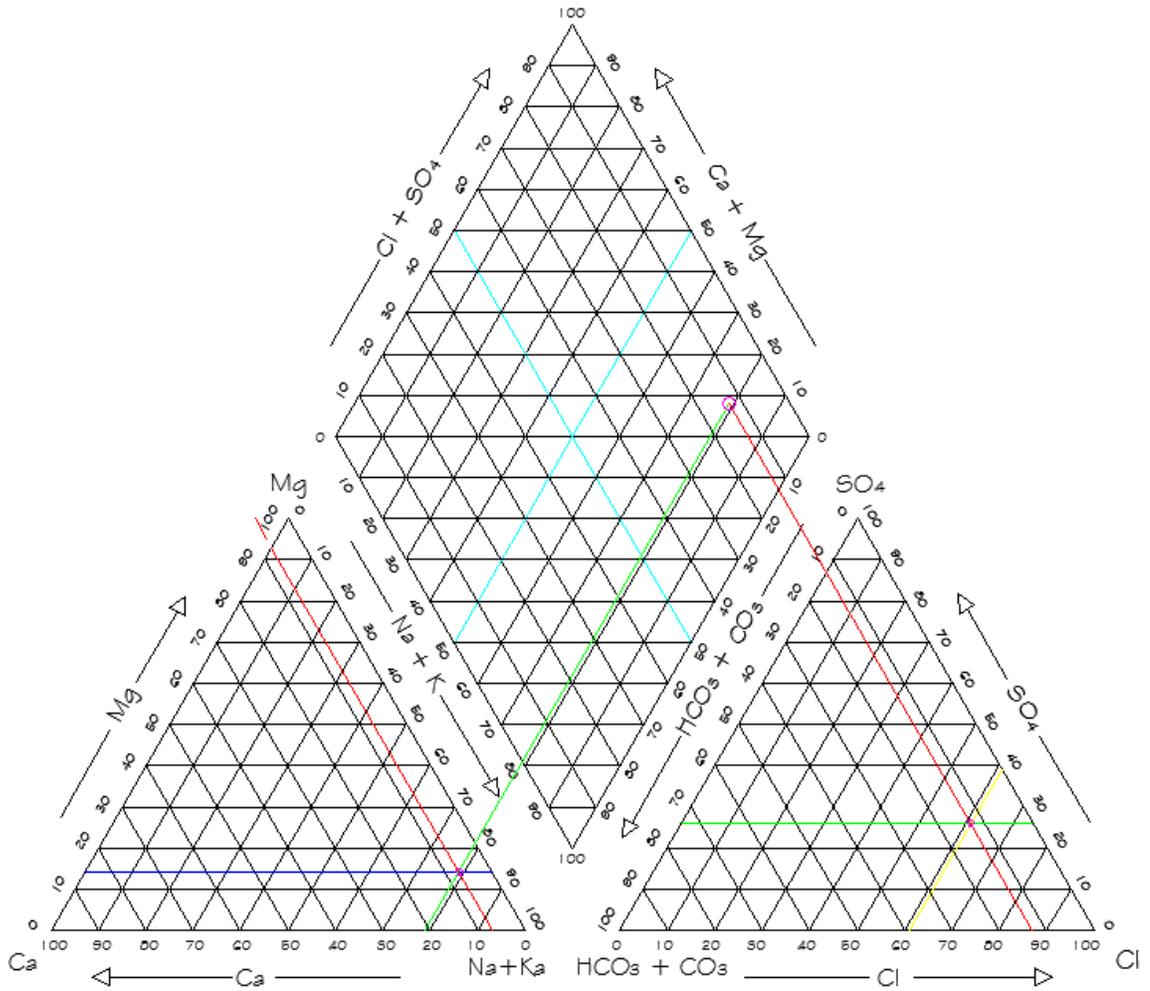
4.5.1. Concentraciones en %meq/l para diagrama de Piper estación seca

Tabla LIX. Estación núm. 1 Época de muestreo: seca

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	4	8	8	7
Mg ⁺²	3	21	18	14
K ⁺ + Na ⁺	93	71	74	79
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	29	4	7	13
Cl ⁻	7	89	87	61
SO ₄ ⁻²	64	7	6	26

Fuente: elaboración propia, datos de concentración % meq/l.

Figura 51. Estación núm. 1 Época de muestreo: seca



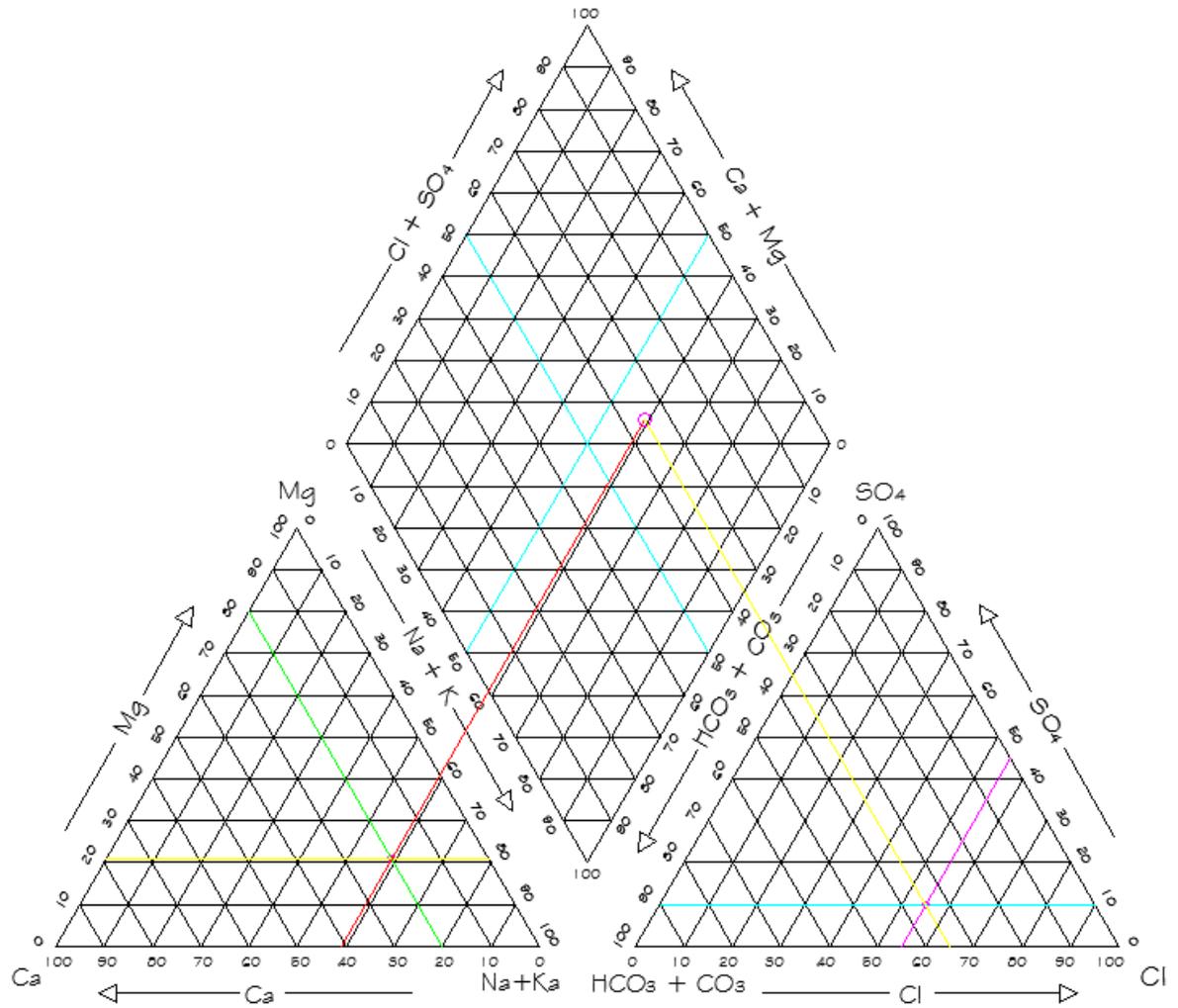
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LX. Estación núm. 2 Época de muestreo: seca

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	25	17	19	20
Mg ⁺²	23	15	26	21
K ⁺ + Na ⁺	53	68	55	59
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	42	24	38	35
Cl ⁻	41	65	60	55
SO ₄ ⁻²	17	11	3	10

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 52. Estación núm. 2 Época de muestreo: seca



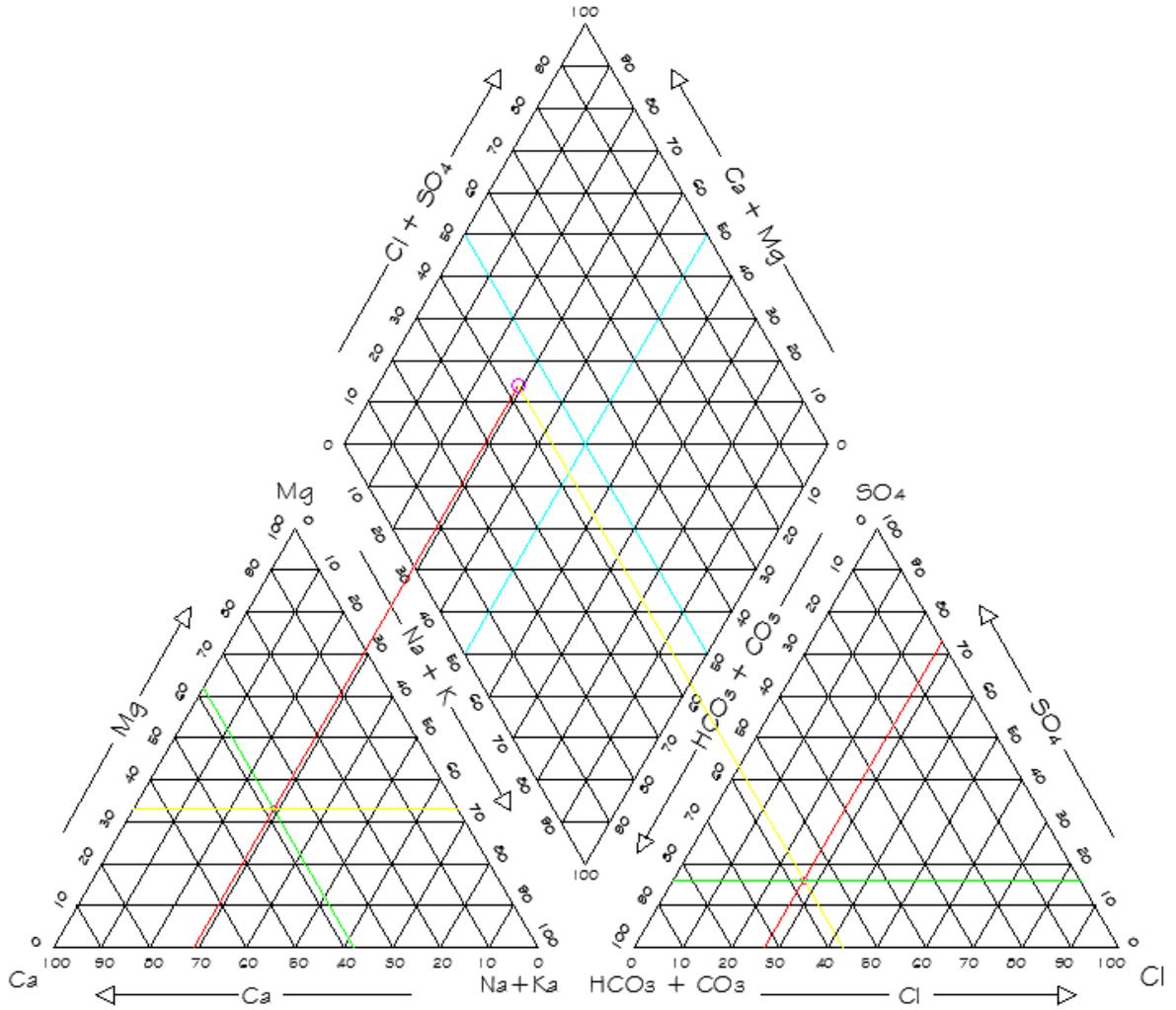
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXI. Estación núm. 3 Época de muestreo: seca

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	41	38	36	39
Mg ⁺²	40	30	27	33
K ⁺ + Na ⁺	19	31	36	29
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	81	59	55	65
Cl ⁻	0	27	28	27
SO ₄ ⁻²	19	14	17	16

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 53. Estación núm. 3 Época de muestreo: seca



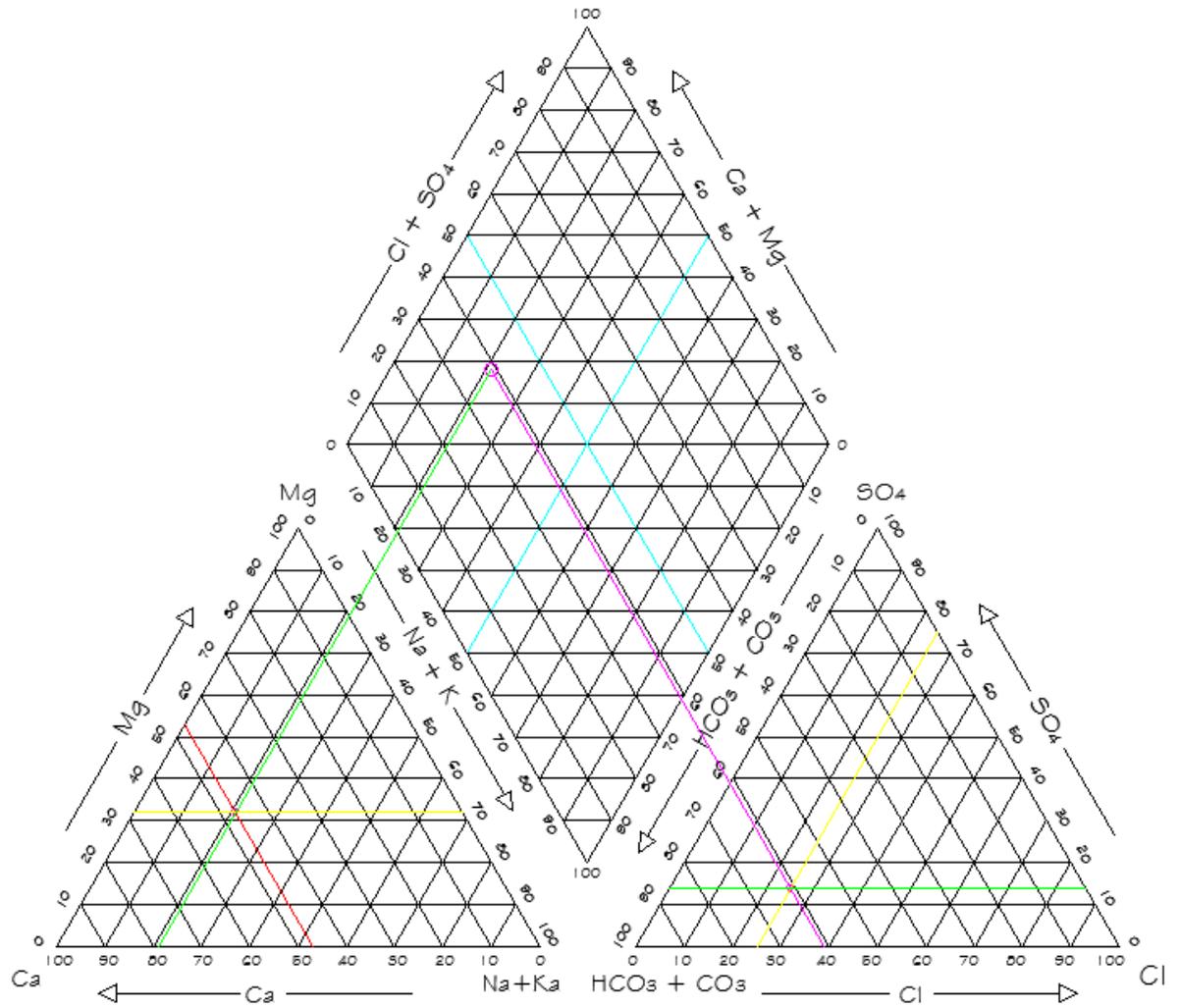
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXII. Estación núm. 4 Época de muestreo: seca

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	42	43	55	47
Mg ⁺²	40	28	28	32
K ⁺ + Na ⁺	18	30	17	22
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	31	63	59	61
Cl ⁻	60	24	26	25
SO ₄ ⁻²	8	13	15	14

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 54. Estación núm. 4 Época de muestreo: seca



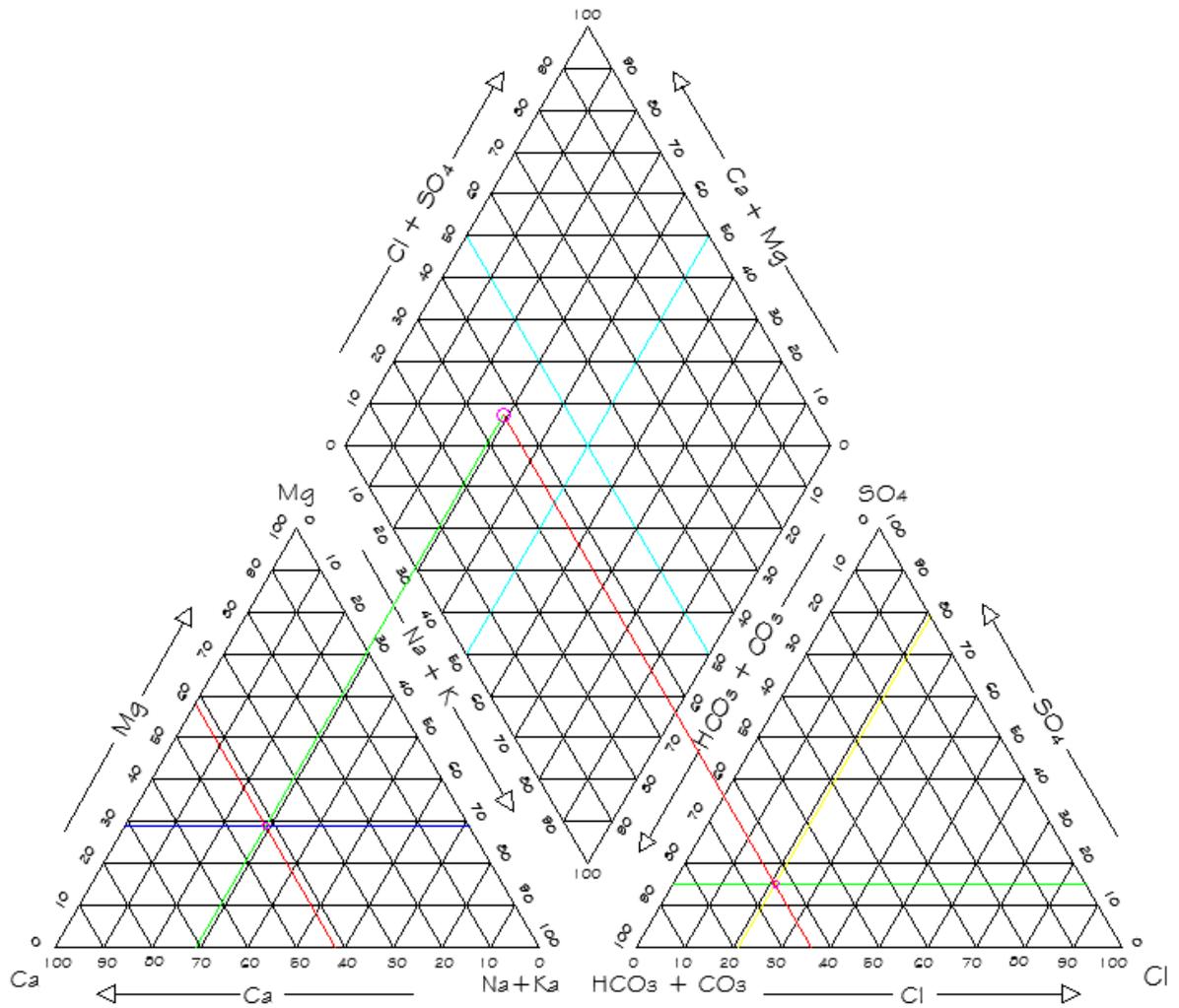
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXIII. Estación núm. 5 Época de muestreo: seca

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	33	43	51	42
Mg ⁺²	30	25	32	29
K ⁺ + Na ⁺	37	32	17	29
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	71	65	57	64
Cl ⁻	12	22	27	20
SO ₄ ⁻²	17	13	16	15

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 55. Estación núm. 5 Época de muestreo: seca



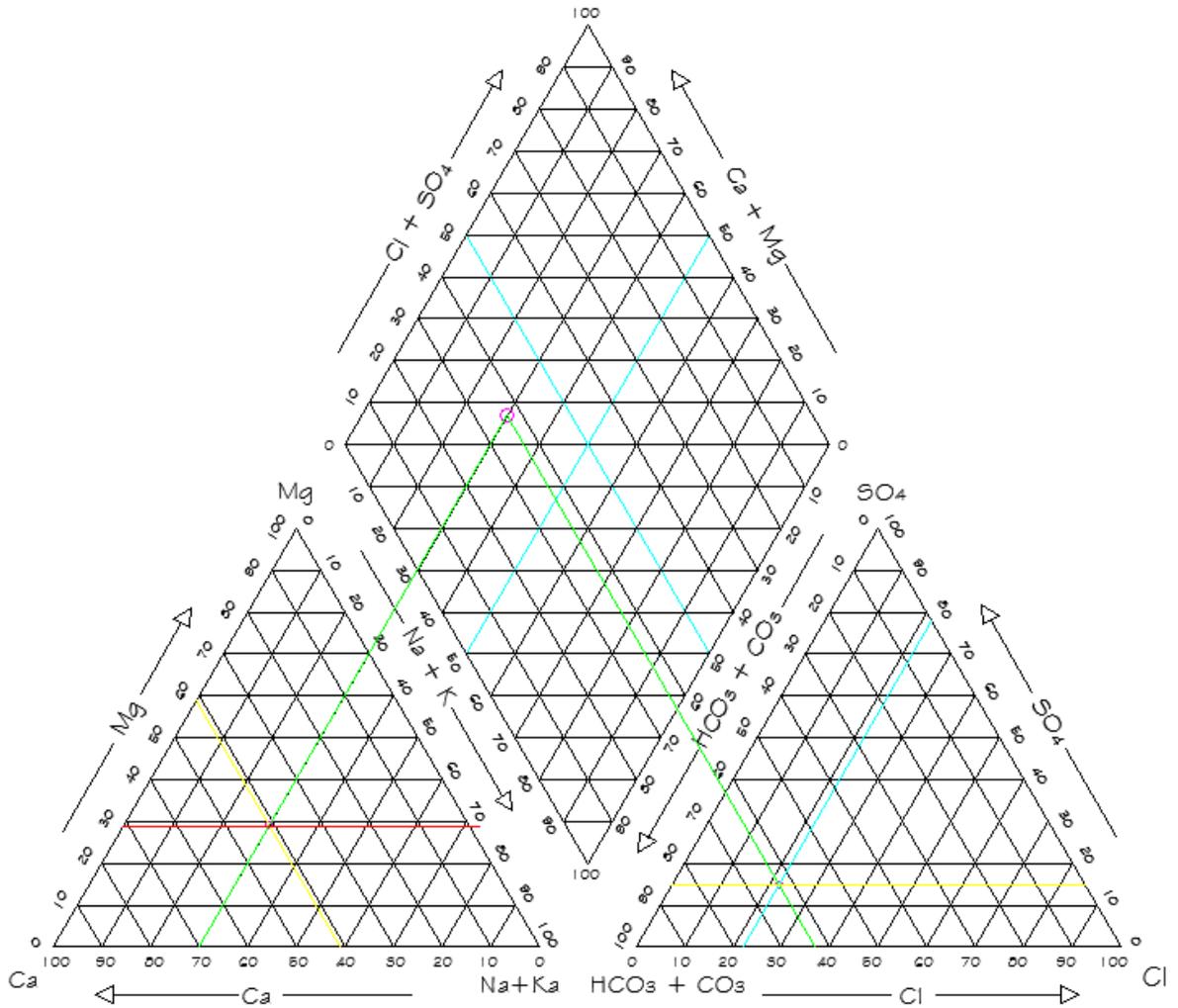
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXIV. Estación núm. 6 Época de muestreo: seca

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	32	38	53	41
Mg ⁺²	29	29	30	29
K ⁺ + Na ⁺	40	33	17	30
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	70	61	58	63
Cl ⁻	13	25	27	22
SO ₄ ⁻²	17	14	16	15

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 56. Estación núm. 6 Época de muestreo: seca



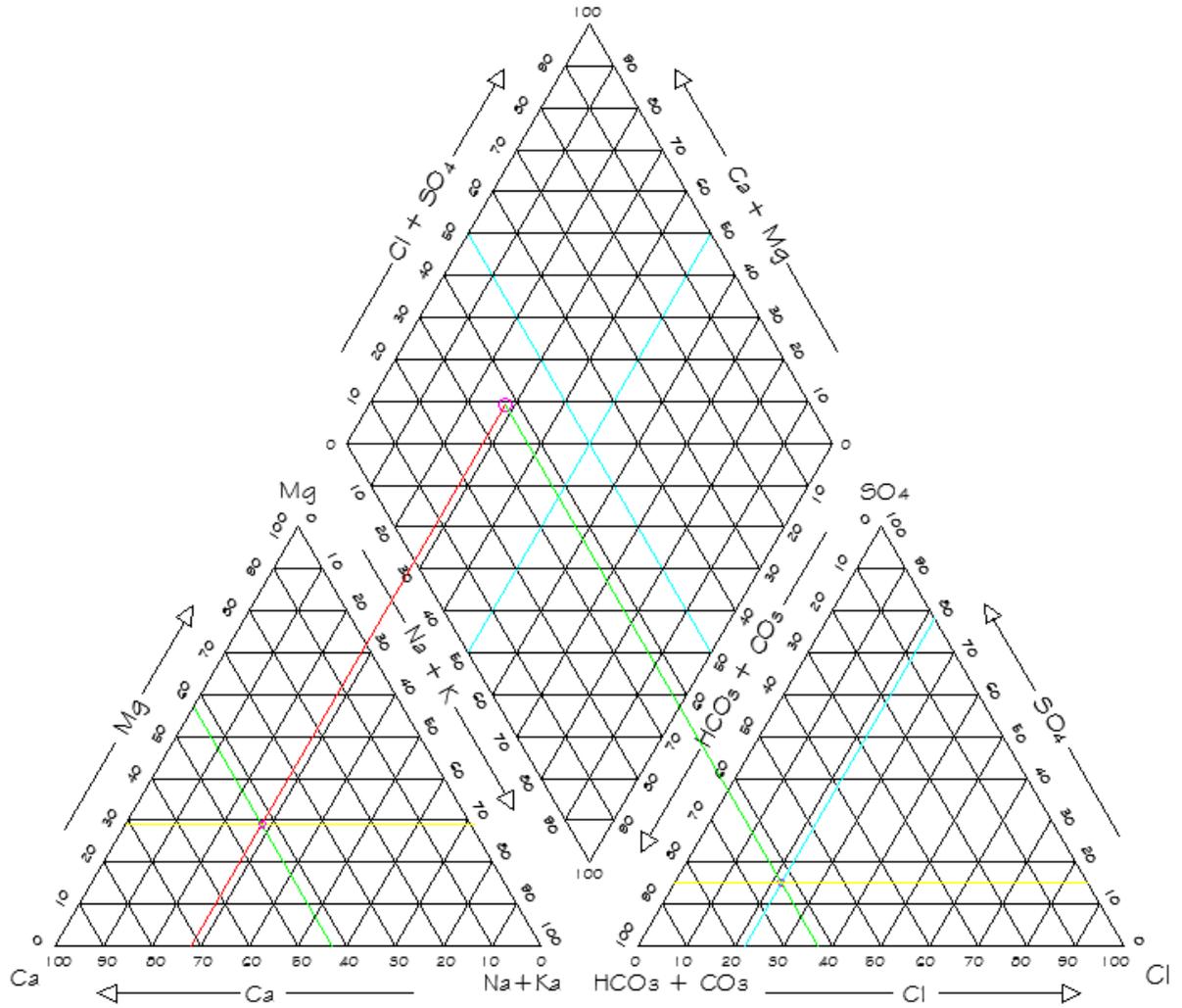
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXV. Estación núm. 7 Época de muestreo: seca

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	37	43	49	43
Mg ⁺²	34	21	33	29
K ⁺ + Na ⁺	29	35	18	28
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	68	62	58	63
Cl ⁻	15	25	26	22
SO ₄ ⁻²	17	13	16	15

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 57. Estación núm. 7 Época de muestreo: seca



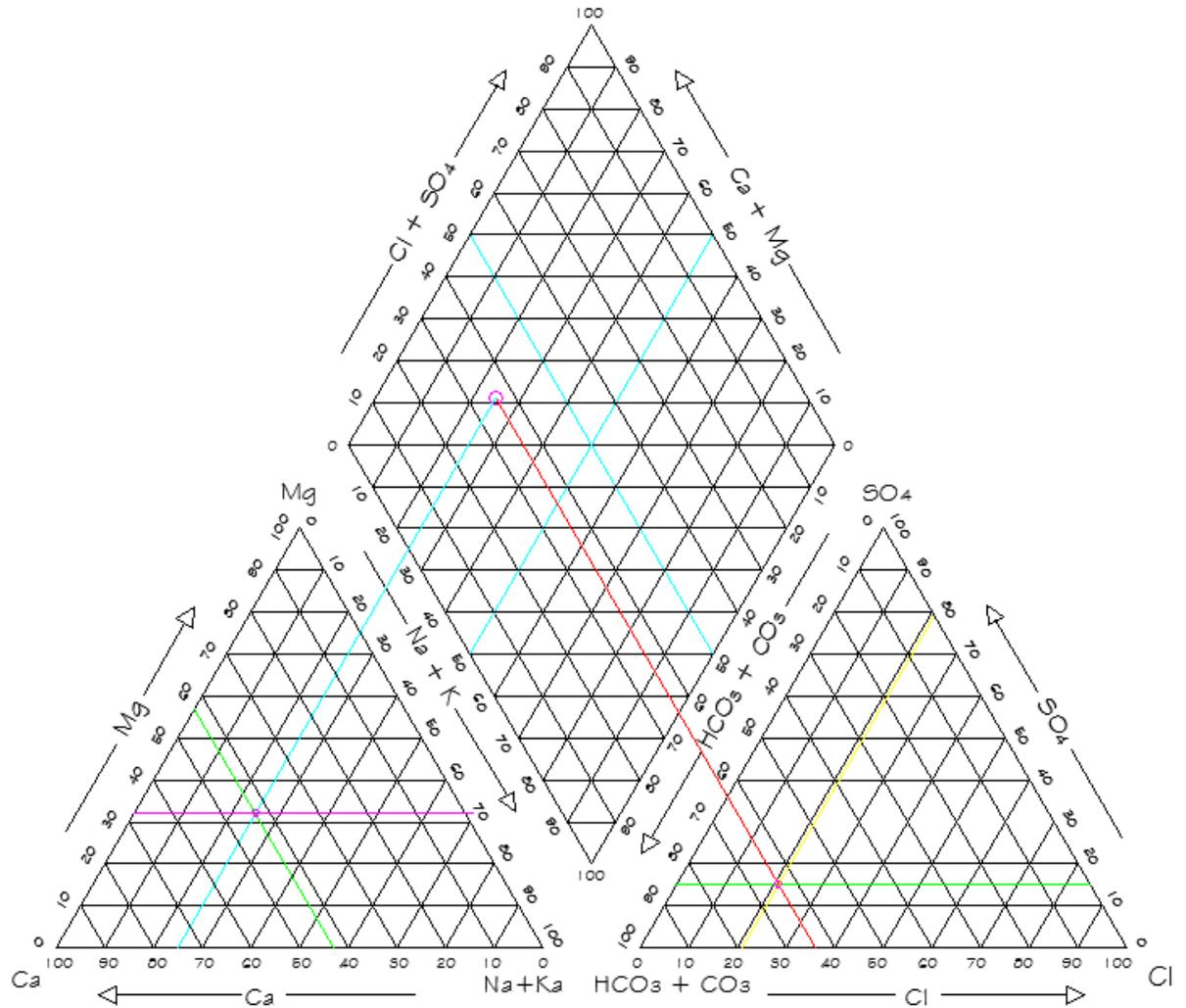
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXVI. Estación núm. 8 Época de muestreo: seca

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	37	44	48	43
Mg ⁺²	34	25	36	32
K ⁺ + Na ⁺	29	31	16	25
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	72	62	58	64
Cl ⁻	11	25	25	20
SO ₄ ⁻²	17	13	17	16

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 58. Estación núm. 8 Época de muestreo: seca



Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

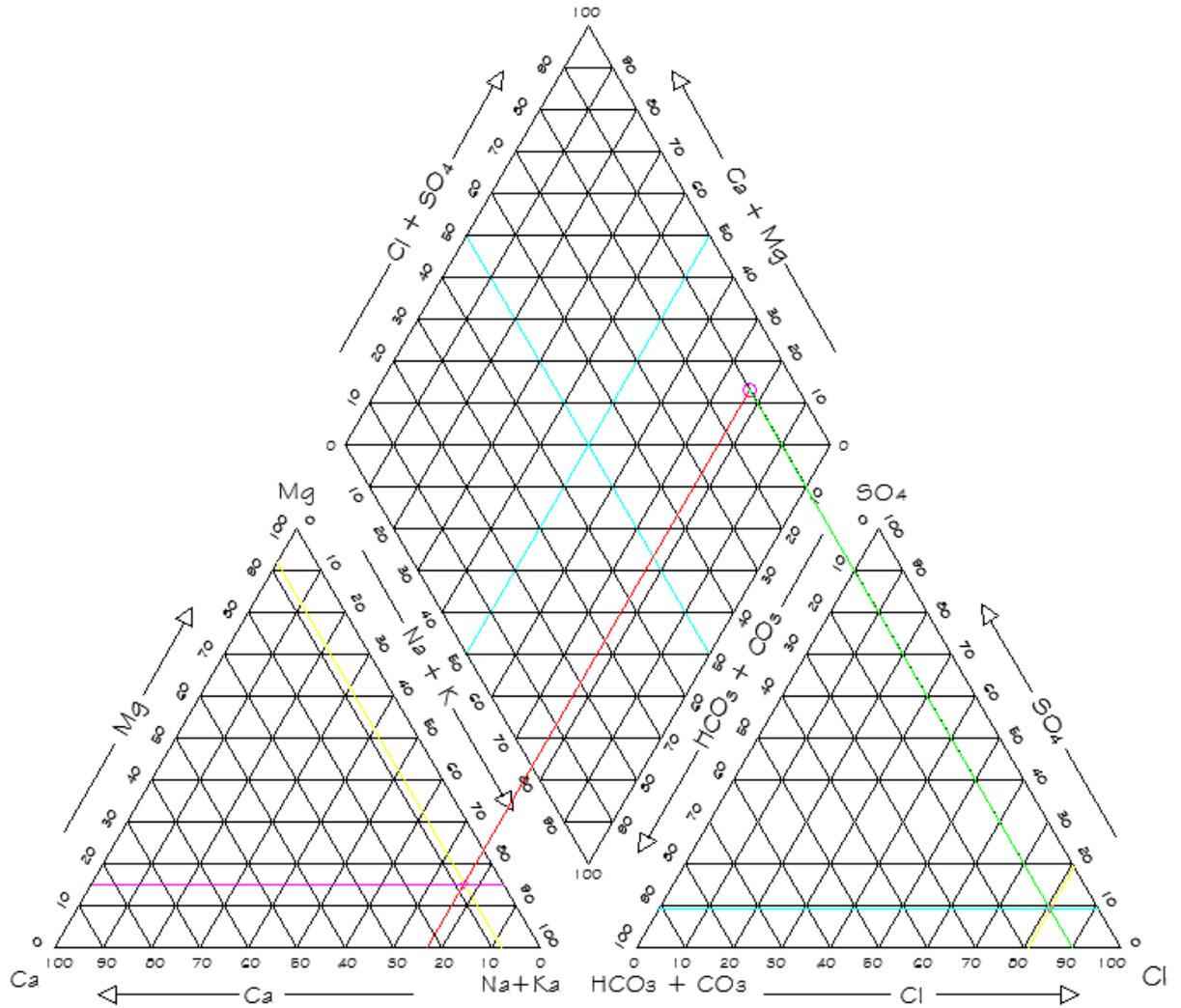
4.5.2. Concentraciones en %meq/l para diagrama de Piper estación húmeda

Tabla LXVII. Estación núm. 1 Época de muestreo: húmeda

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	6	8	11	8
Mg ⁺²	16	10	19	15
K ⁺ + Na ⁺	78	82	70	77
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	8	15	8	10
Cl ⁻	83	75	84	81
SO ₄ ⁻²	9	9	8	9

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 59. Estación núm. 1 Época de muestreo: húmeda



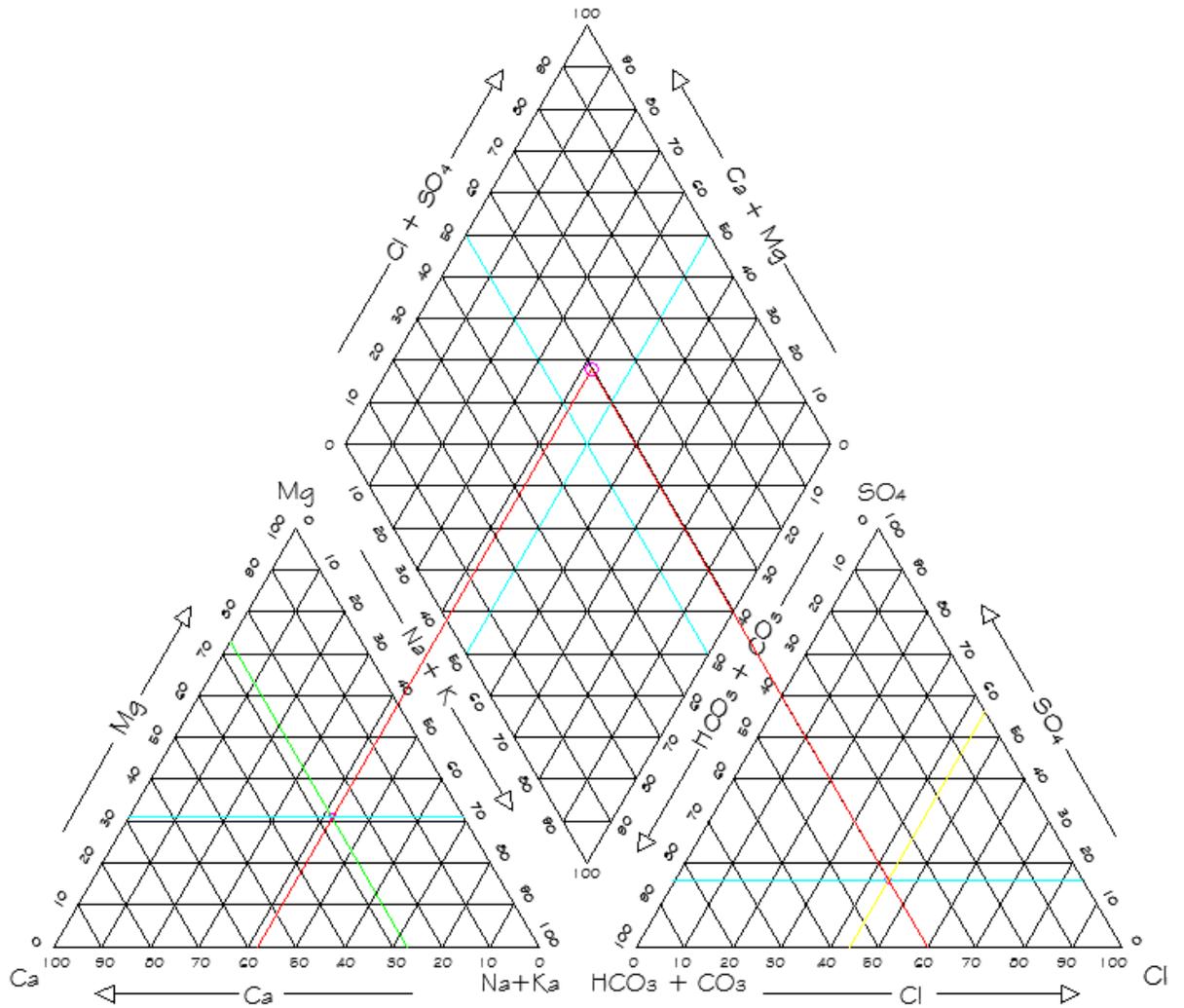
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXVIII. Estación núm. 2 Época de muestreo: húmeda

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	29	22	32	27
Mg ⁺²	40	28	26	31
K ⁺ + Na ⁺	31	50	43	41
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	40	39	41	40
Cl ⁻	38	49	44	44
SO ₄ ⁻²	22	12	15	16

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 60. Estación núm. 2 Época de muestreo: húmeda



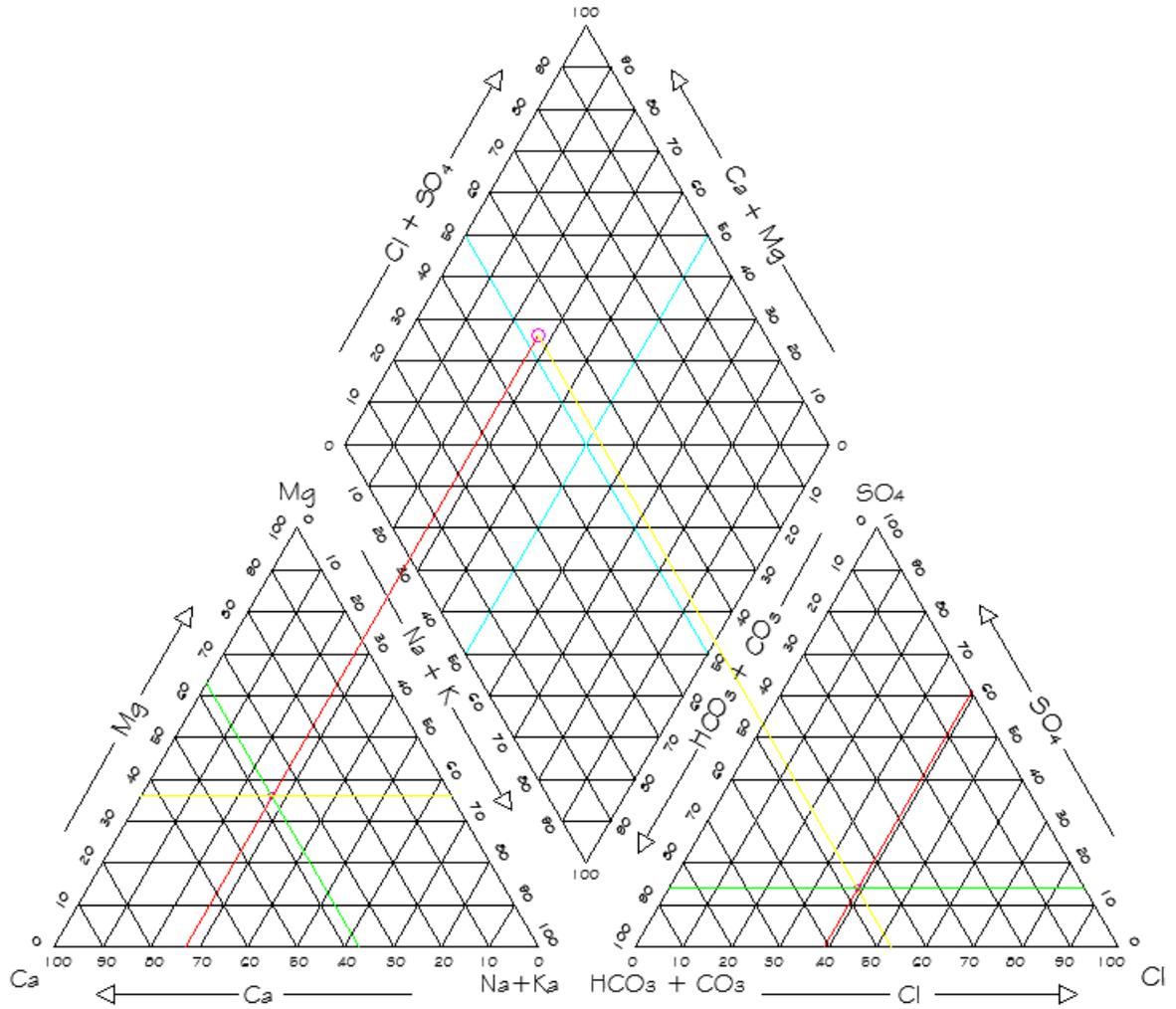
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXIX. Estación núm. 3 Época de muestreo: húmeda

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	32	41	38	37
Mg ⁺²	40	30	38	36
K ⁺ + Na ⁺	28	29	25	27
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	50	61	29	47
Cl ⁻	30	25	63	39
SO ₄ ⁻²	19	14	8	14

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 61. Estación núm. 3 Época de muestreo: húmeda



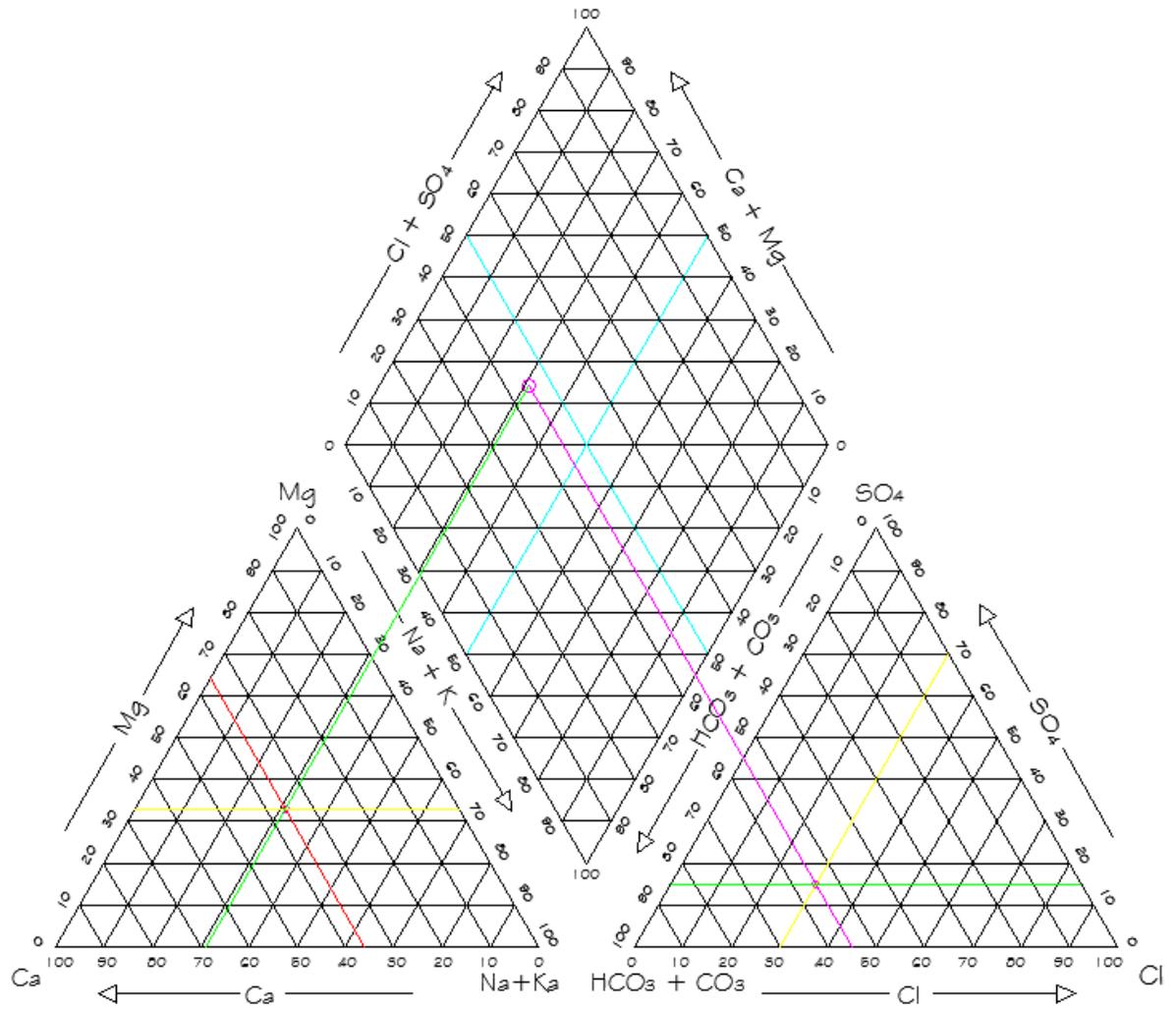
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXX. Estación núm. 4 Época de muestreo: húmeda

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	29	35	43	36
Mg ⁺²	42	30	28	33
K ⁺ + Na ⁺	28	36	29	31
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	46	59	60	55
Cl ⁻	37	28	26	30
SO ₄ ⁻²	17	13	15	15

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 62. Estación núm. 4 Época de muestreo: húmeda



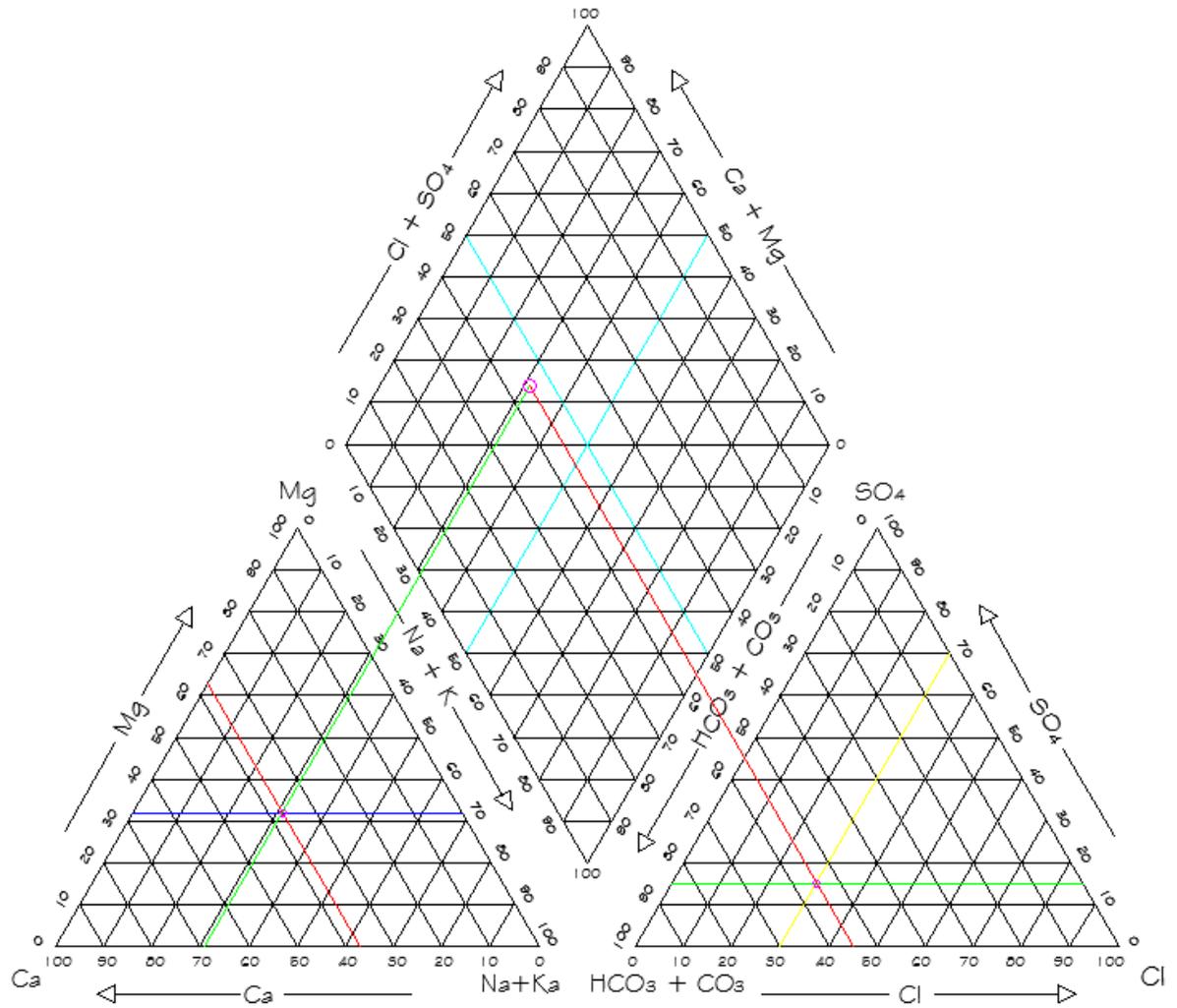
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXXI. Estación núm. 5 Época de muestreo: húmeda

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	34	37	40	37
Mg ⁺²	34	30	34	32
K ⁺ + Na ⁺	33	33	26	31
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	49	58	58	55
Cl ⁻	33	29	27	30
SO ₄ ⁻²	18	13	14	15

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 63. Estación núm. 5 Época de muestreo: húmeda



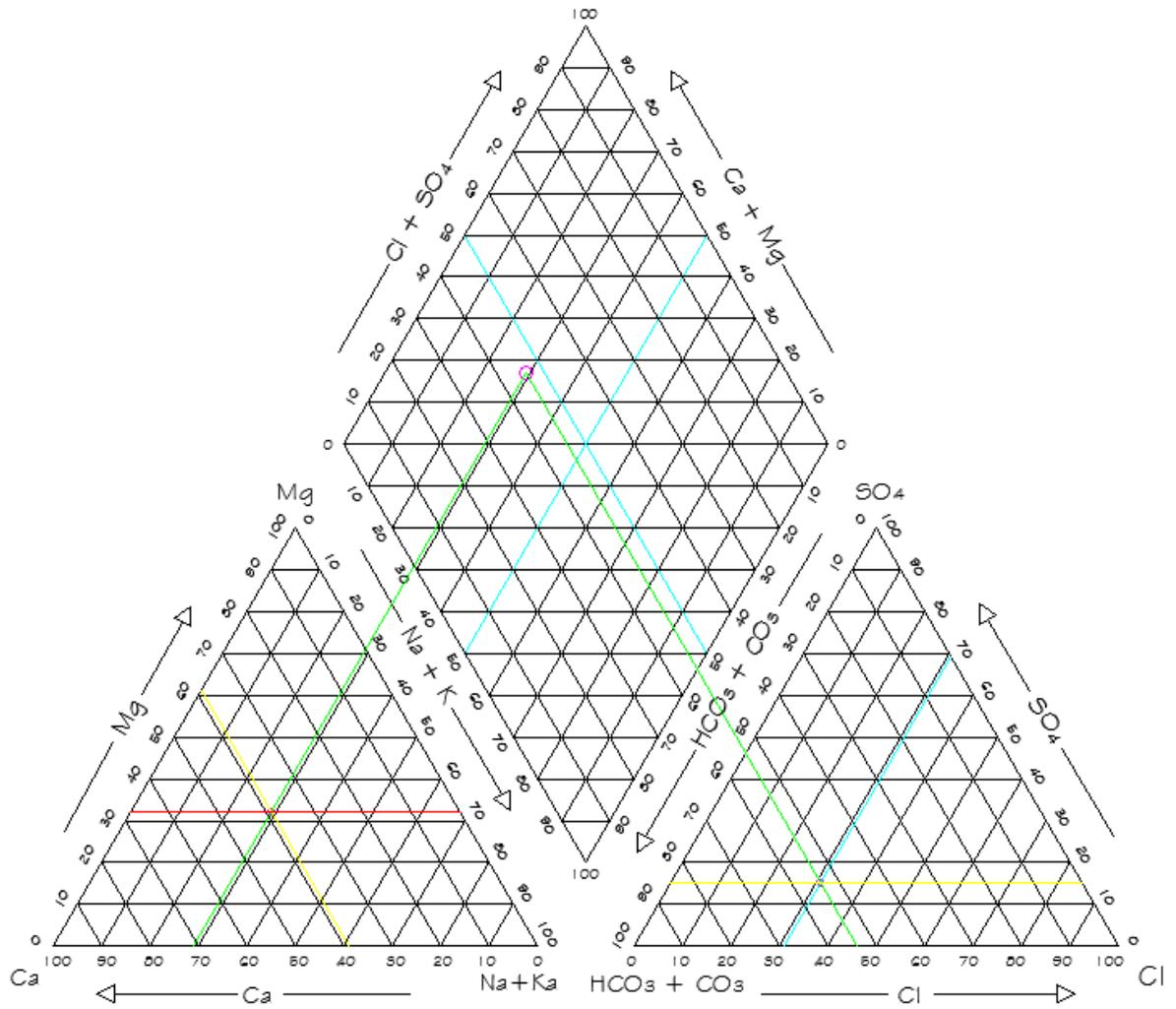
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXXII. Estación núm. 6 Época de muestreo: húmeda

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	32	45	40	39
Mg ⁺²	36	23	37	32
K ⁺ + Na ⁺	31	32	23	29
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	51	57	54	54
Cl ⁻	34	29	30	31
SO ₄ ⁻²	15	15	16	15

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 64. Estación núm. 6 Época de muestreo: húmeda



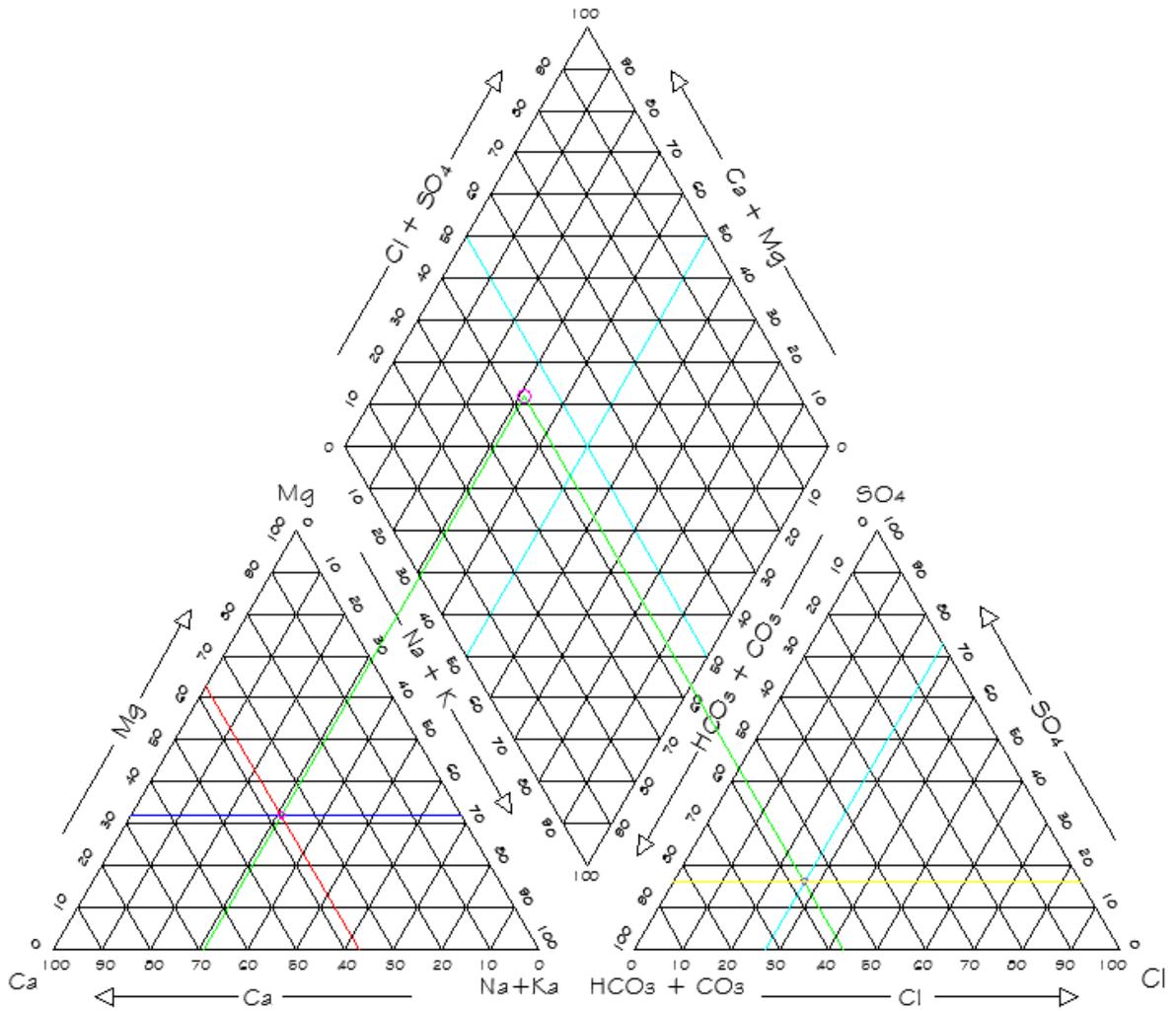
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXXIII. Estación núm. 7 Época de muestreo: húmeda

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	32	40	40	37
Mg ⁺²	36	24	35	32
K ⁺ + Na ⁺	31	37	25	31
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	55	59	57	57
Cl ⁻	29	26	27	27
SO ₄ ⁻²	16	15	16	16

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 65. Estación núm. 7 Época de muestreo: húmeda



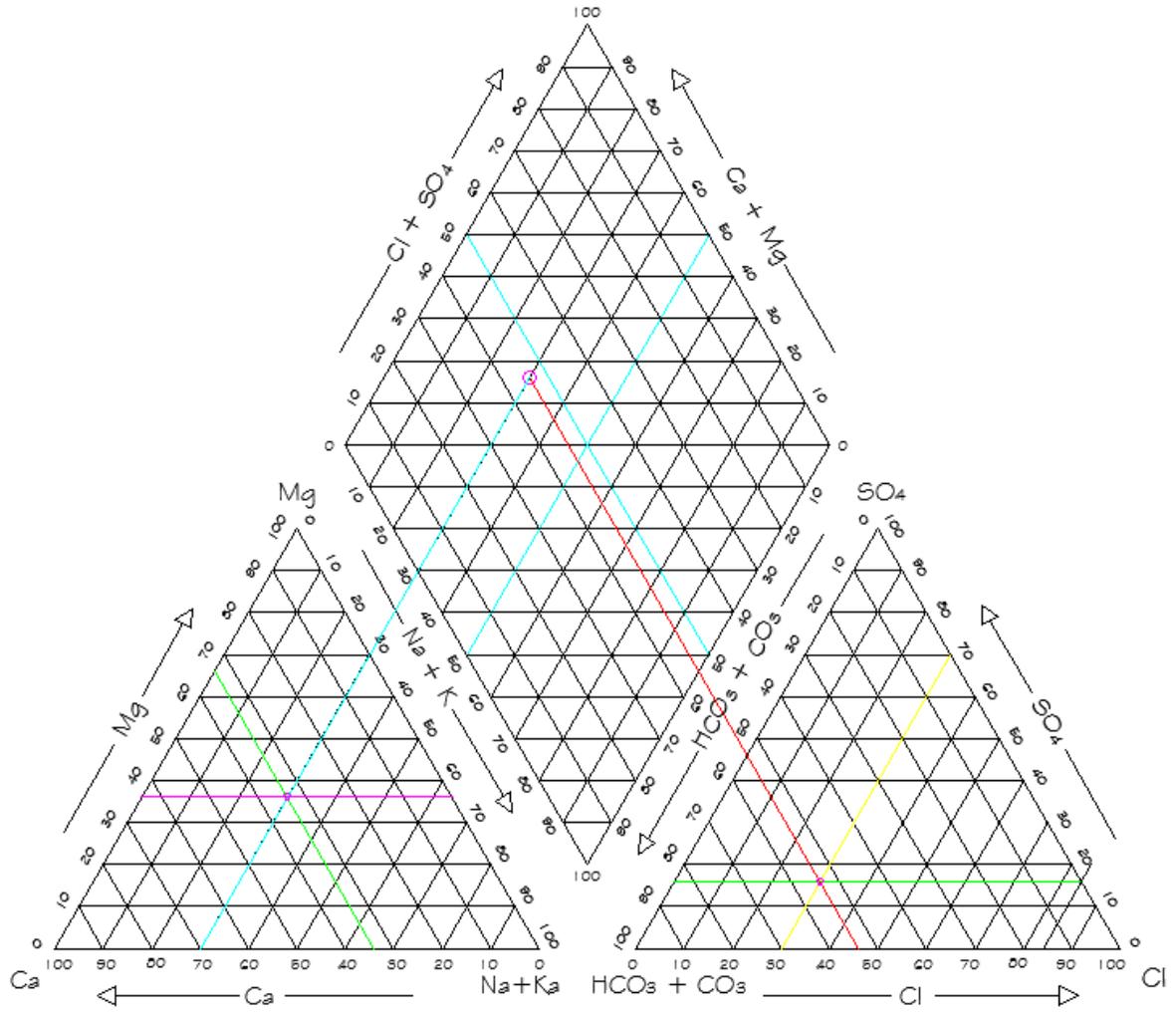
Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Tabla LXXIV. Estación núm. 8 Época de muestreo: húmeda

Cationes				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
Ca ⁺²	30	31	42	34
Mg ⁺²	42	38	29	36
K ⁺ + Na ⁺	28	31	30	30
Aniones				
Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración promedio (%)
HCO ₃ ⁻	52	57	54	54
Cl ⁻	32	27	30	30
SO ₄ ⁻²	16	16	16	16

Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

Figura 66. Estación núm. 8 Época de muestreo: húmeda



Fuente: elaboración propia, datos de concentración %meq/l.

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Análisis del fenómeno de intrusión marina con base en diagramas de Piper y casos típicos de agua según método utilizado

A partir de los diagramas de Piper mostrados en la sección de resultados, se detalla la evolución iónica del agua. Se analizó según el rombo de clasificación que muestra los casos típicos de agua para el diagrama de Piper. De esta manera, se esquematizó, aproximadamente, el fenómeno de intrusión marina, en consideración a las diferentes épocas del año en el país. La época seca comprende de noviembre a abril, y la húmeda, de mayo a octubre.

5.1.1. Comportamiento del contenido iónico del agua, época seca

En el rombo de clasificación de agua, en el diagrama de Piper y los casos típicos de agua, se observa el cambio entre las concentraciones en cada estación muestreada. Punto 1, que corresponde a la estación de muestreo No. 1, correspondiente dentro del mismo, al grupo de agua de mar es notorio y se observa en que los datos de concentración para sodio y potasio oscila entre 65 y 70 % de concentración en porcentaje de meq/l en relación con su grupo (cationes). Se toma en cuenta que cada punto plasmado en el rombo, corresponde a una estación diferente.

La distancia entre cada estación osciló entre los 800 y 1 000 metros y se observó que para la estación núm. 2 disminuye el contenido de sodio y potasio

que oscila entre un 60 % en porcentaje de meq/l, el mismo porcentaje se obtuvo para cloruros.

Se determinó que, a partir de la estación de muestreo núm. 3, en adelante cambia drásticamente el comportamiento de las concentraciones contenidas en cada muestra, según su estación. Así mismo cambió la clasificación para este tipo de agua, cuya referencia se basa en las características geomorfológicas del área donde se llevaron a cabo los muestreos que determinan esta la clasificación:

- Till glacial
- Rocas carbonatadas
- Rocas cristalinas

Con base en los datos de los resultados de laboratorio, se puede asegurar que las concentraciones de bicarbonatos, magnesio y calcio, agentes responsables de la dureza del agua, no son representativas y no generan riesgo alguno.

5.1.2. Comportamiento del contenido iónico del agua, época húmeda

En las estaciones de muestreo 2 y 3 se observó una ligera presencia de sulfatos representados dentro del rombo de clasificación de agua del diagrama de Piper (figura 68). Para esta época de muestreo, se consideró el caudal del río y posibles factores externos que pueden variar la concentración del mismo en esta región. Por ejemplo, el aporte de la cantidad de agua que escurre a razón de la precipitación pluvial lleva consigo componentes químicos de

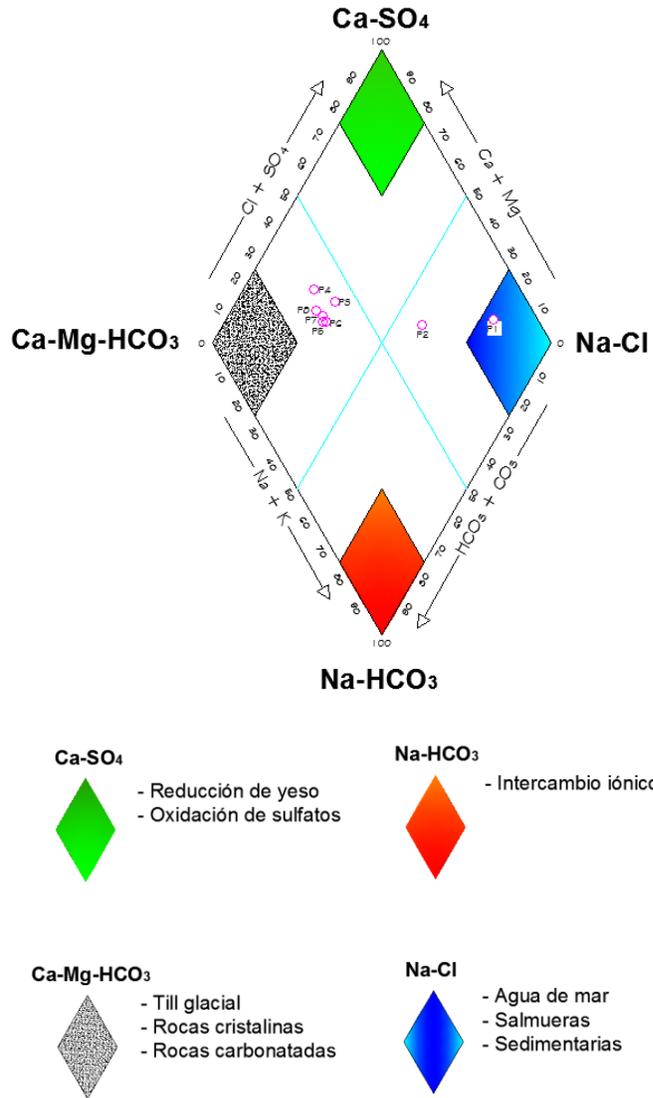
fertilizantes y fungicidas a base de azufre utilizados en las actividades agrícolas que se desarrollan paralelas a la trayectoria del río.

Las concentraciones de estos componentes que pueden alterar sus características, ya que, en la temporada lluviosa, se llevan a cabo aspersiones (fumigaciones) con más frecuencia que en la época seca del año. Esto se debe a que los hongos proliferan con la humedad, y las fumigaciones impiden la reproducción de plagas en estas extensiones cultivadas.

Se debe tomar en cuenta que, a partir de la estación de muestreo 4 en adelante, se observaron las mismas características que en la época seca. Se tomaron en cuenta las características geomorfológicas y condiciones mineralógicas del suelo. De ello se obtuvo la misma clasificación en la región del rombo del diagrama de Piper de bicarbonatos, magnesio y calcio.

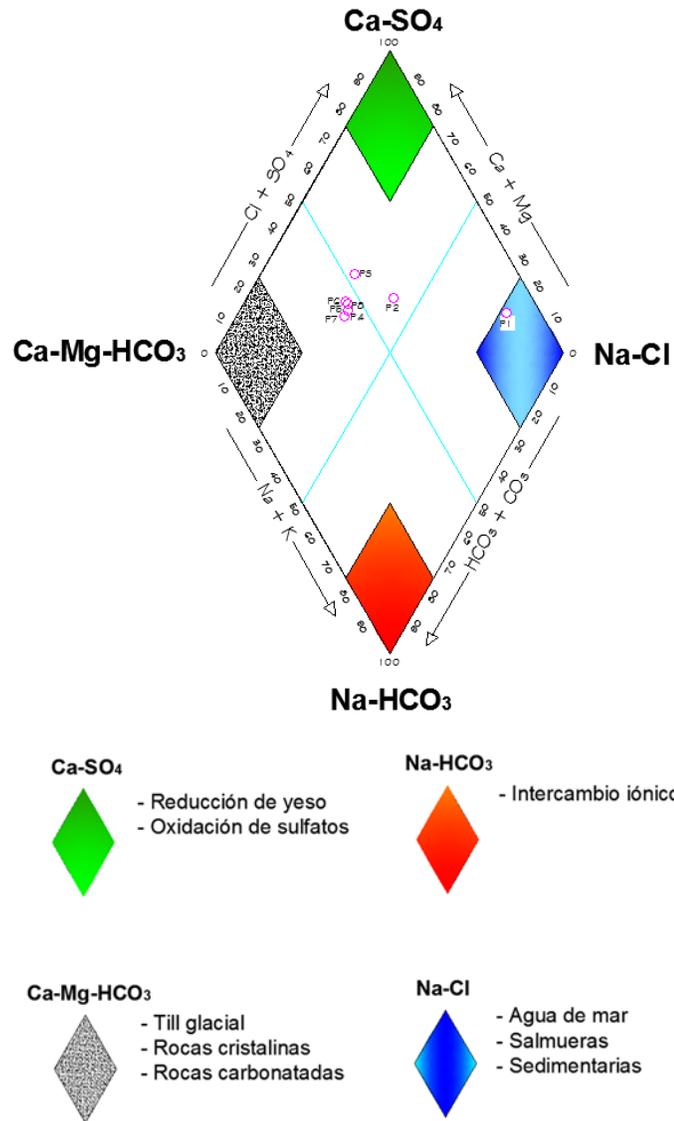
Los datos de las representaciones de %meq/l se mantienen constantes dentro del cuadrante del rombo de clasificación. Con base en los resultados de laboratorio se puede afirmar que las concentraciones antes mencionadas no representan riesgo para su uso. Se debe enfatizar que este estudio se basa en el agua superficial (río) mas no así en agua subterránea (pozo).

Figura 67. Rombo de clasificación de diagrama de Piper, época seca.



Fuente: elaboración propia.

Figura 68. Rombo de clasificación, diagrama de Piper época húmeda.



Fuente: elaboración propia.

5.2. Comportamiento del fenómeno de intrusión marina con base en la época del año analizada

Como se observó en la sección de resultados, las concentraciones de aniones y cationes sufren una variación en función de la época del año, en la cual se llevaron a cabo los muestreos correspondientes (época seca, época húmeda). El resultado del análisis indica que, a mayor precipitación pluvial, existe una mayor recarga en las capas freáticas que componen el acuífero costero en la cuenca del río Suchiate. En época lluviosa se puede observar un desplazamiento de la intrusión hacia la llanura costera, debido al mayor caudal del río en esta temporada. Esto provoca el desplazamiento iónico que el mar aporta en relación a las concentraciones de cationes presentes en el agua de mar.

En época seca, a falta de precipitación pluvial, o periodos prolongados de escasas de la misma, sucede el efecto contrario que en la época húmeda o lluviosa. El nivel freático disminuye y con él, la recarga del mismo. Esto provoca un menor aporte al caudal del río, al favorecer la intrusión salina del mar a partir de la llanura costera, tierra adentro.

5.2.1. Desplazamiento de interfase aproximada con base a los puntos de control y época de muestreo

Al tener como referencia el comportamiento del contenido iónico del agua mostrado en los rombos de clasificación del diagrama de Piper (figuras 67 y 68), se realizó un esquema para cada época de muestreo, con el objeto de establecer la línea de interfase aproximada entre el agua de mar y agua dulce. Esto describe la distancia entre el delta aluvial (bocabarra) y el área donde

incide el contenido iónico del agua de mar, la cual posee concentraciones altas de sodio, potasio y cloruros.

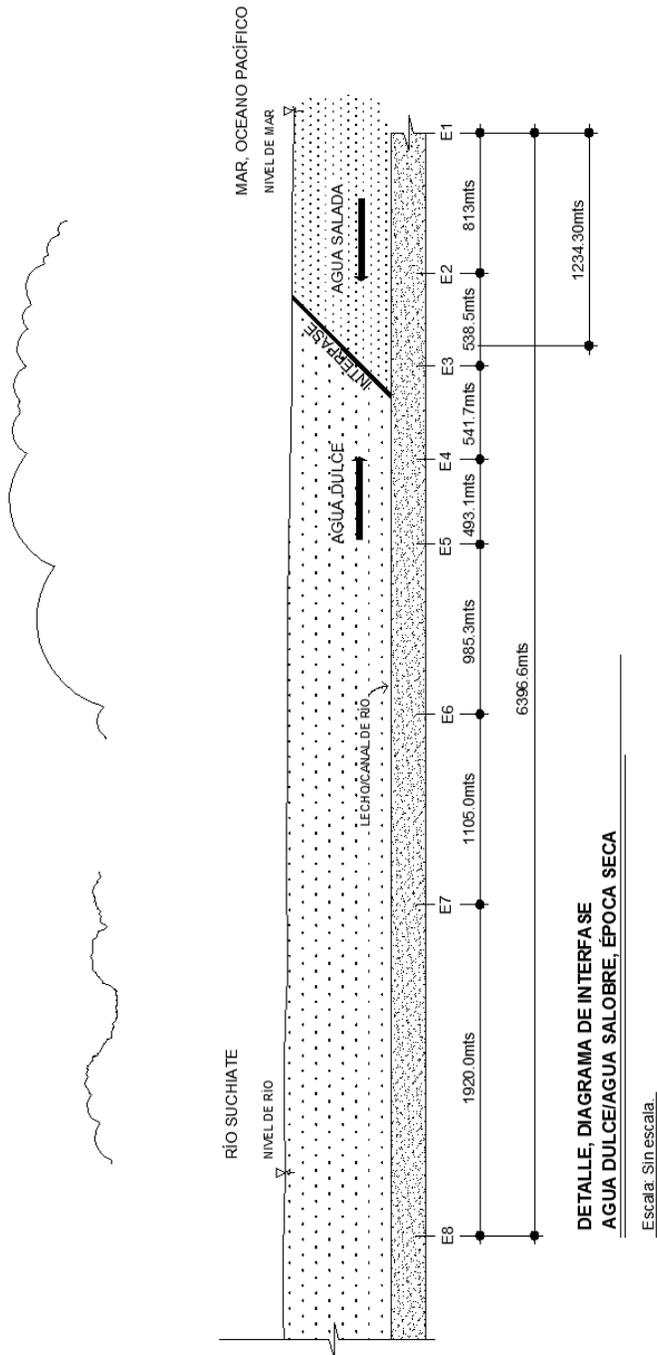
5.2.1.1. Época seca

Con base en el comportamiento iónico mostrado en el rombo de clasificación del agua, según el diagrama de Piper, (figura 67), se realizó un esquema (figura 69) para establecer la línea o interfase aproximada donde, posiblemente, ocurre la transición entre agua de mar y agua dulce, la cual muestra una distancia aproximada de transición desde el delta aluvial-río adentro, para esta época de muestreo de 1 234,3 metros.

5.2.1.2. Época húmeda

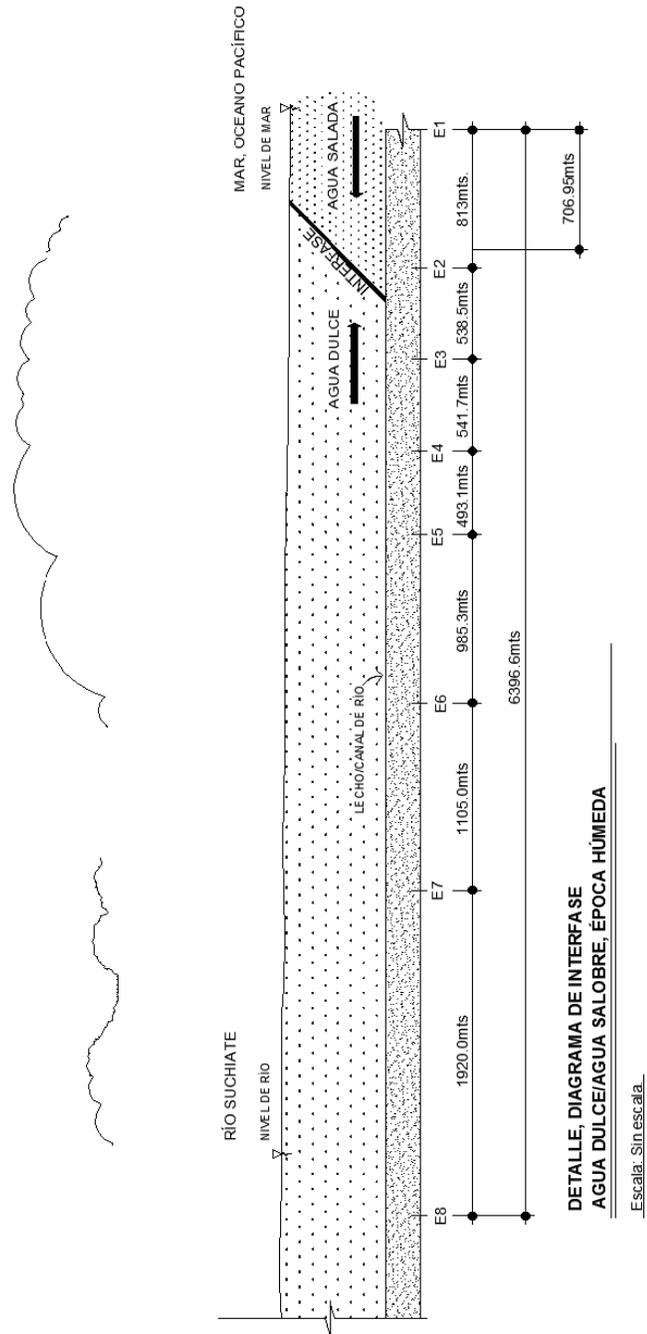
Con base en el comportamiento iónico mostrado en el rombo de clasificación del agua, según el diagrama de Piper, (figura 68), se realizó un esquema (figura 70) para establecer la línea o interfase aproximada donde, posiblemente, ocurre la transición entre agua de mar y agua dulce, la cual muestra una distancia aproximada de transición desde el delta aluvial-río adentro, para esta época de muestreo de 706,95 metros.

Figura 69. Línea de interfase aproximada para época seca



Fuente: elaboración propia.

Figura 70. Línea de interfase aproximada para época húmeda



Fuente: elaboración propia.

5.3. Análisis de la incidencia del contenido iónico del agua según puntos de control para uso y explotación

En cada etapa de muestreo de la estación núm. 1, se observó que la pesca artesanal es la única actividad a desarrollarse en esta área. Este es el medio de subsistencia de las personas que habitan la llanura costera aledaña a la bocanara del Río Suchiate, en el municipio de Ocosingo del departamento de San Marcos. El uso y explotación del agua queda limitado debido al contenido iónico que en esta área contiene.

Figura 71. **Actividad principal, estaciones 1 y 2: Pesca artesanal**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 28/07/2014 11h08min, río Suchiate.

Con base en la sección de resultados y análisis hidroquímico ensayado a las muestras de agua, se estableció que a partir de la estación de muestreo No. 4 tanto en época seca y húmeda, no existió una incidencia notoria del frente de intrusión marina. Se tomó en cuenta la geomorfología del área de la cuenca que constituye el río Suchiate y otros factores como la dureza (bicarbonatos) y el contenido de sulfatos presente en el agua. Esto se debe a que el río nace en un área volcánica y la acción del agua, como un agente transportador de partículas, lleva a cabo el arrastre natural de material del suelo con propiedades

y características mineralógicas. El transporte y fricción de las rocas con el agua, podría liberar iones contenidos dentro de las mismas.

Al considerar los resultados de laboratorio, se determinó que las concentraciones no superan los límites permisibles para el consumo humano, uso y explotación, se tiene en cuenta que estos datos se practicaron directamente en el río (superficial), más no así en agua subterránea (pozos).

Figura 72. **Material transportado de canto rodado**



Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 28/07/2014 11h08min, río Suchiate.

A partir de la estación de muestreo núm. 4, se observó que el uso principal que se le da al agua en esta región es el riego en actividades agrícolas, cabe mencionar que se utiliza paralelo al agua del río, el agua directa del manto freático (pozo). No se toman en cuenta otros factores u actividades que pudiesen alterar las características y propiedades del agua por contaminación antropogénica, debido a que este estudio se basa directamente en el análisis del frente de intrusión marina y la evaluación de los iones que para este estudio se requiere.

Figura 73. **Uso del agua para riego en plantaciones**



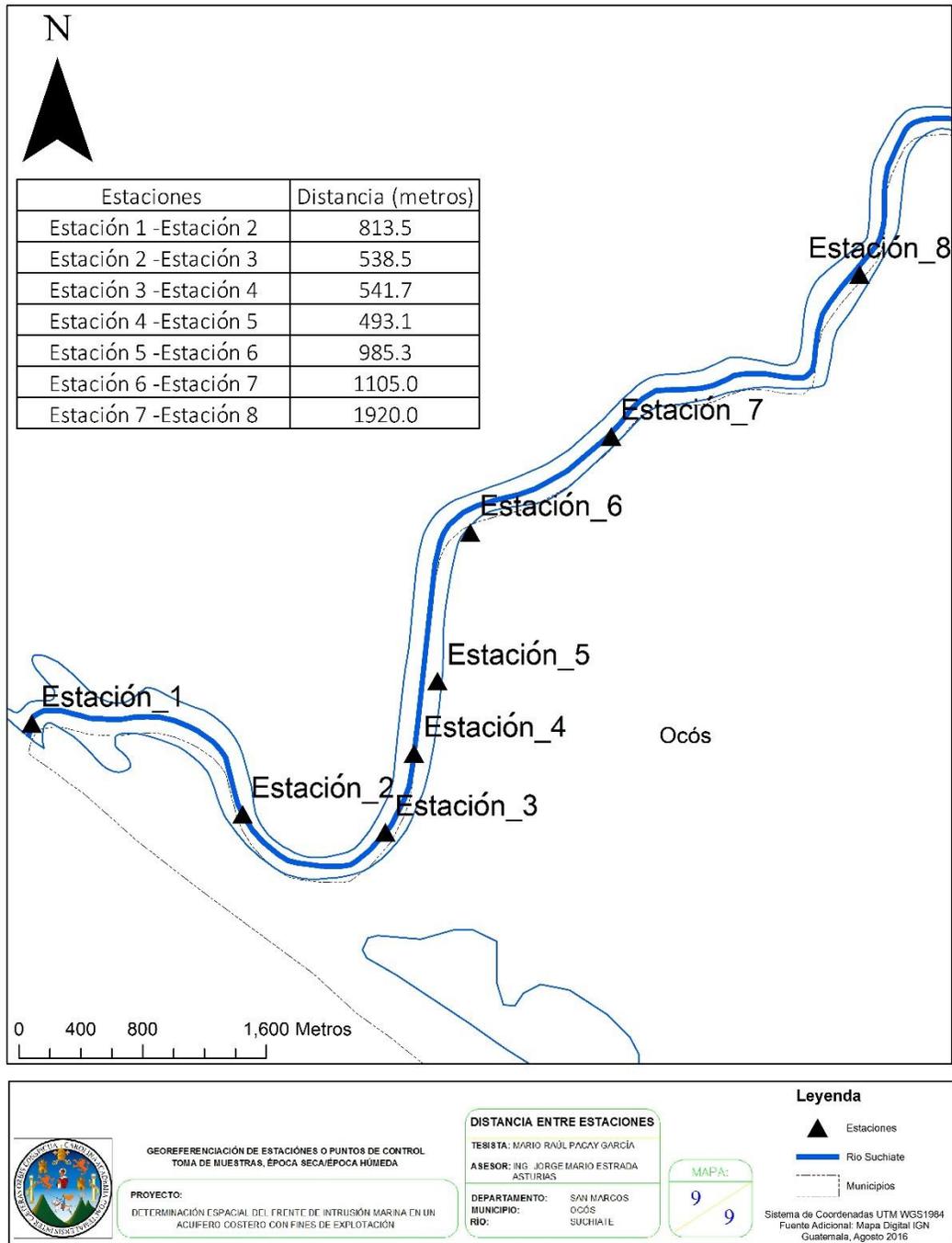
Fuente: elaboración propia, tomada por el autor el 28/07/2014 11h08min.

5.4. Análisis de la variación de las distancias entre cada estación (punto) de muestreo

Con base a lo establecido en la sección 3.10 Análisis estadístico para la determinación de puntos de muestreo, se obtuvo de manera teórica una distancia aproximada de 0,8 km (800 metros) entre cada estación de muestreo, que se consideró una situación ideal en el tramo del cuerpo de agua que se evaluó, el cual para fines de este estudio fue el río Suchiate.

Las características geomorfológicas y de acceso, no permitieron que se cumplieran las condiciones y distancias que se establecieron por el método estadístico, tomando en cuenta que por la naturaleza y objetivo de este estudio que fue la determinación espacial del frente de intrusión marina en un acuífero costero, las estaciones (puntos) de muestreo de mayor interés, fueron las más cercanas a la bocanarra (desembocadura del río con el mar). En la Figura 74. Mapa general, Estaciones de muestreo, se muestran las posiciones y distancias entre cada estación (punto) de muestreo.

Figura 74. Mapa general, estaciones de muestreo



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que, a mayor recarga de los acuíferos en la cuenca del Río Suchiate por el aporte de la precipitación pluvial, existió un desplazamiento de la zona o línea de interfase entre agua de mar y agua dulce hacia la llanura costera.
2. En época seca, se observó la disminución del caudal del río Suchiate, lo cual favoreció el fenómeno de intrusión marina, que provocó un desplazamiento de la línea de interfase hacia el interior del acuífero, por lo que se modificó las características iónicas del agua en dicha zona.
3. La intrusión marina en época seca para el río Suchiate, ubicado en el departamento de San Marcos, presentó la zona o línea de interfase aproximada a una distancia de 1 234,3 metros a partir de la bocabarra hacia el interior del río.
4. La intrusión marina en época húmeda para el río Suchiate, presentó la zona o línea de interfase aproximada a una distancia de 706,95 metros a partir de la bocabarra hacia el interior del río.
5. En el tramo en estudio se determinó que la actividad agrícola tuvo influencia al elevarse el contenido de las concentraciones de sulfatos para las estaciones 2 y 3 en la época de muestreo húmeda. En esta época del año, son más frecuentes las actividades de aspersión (fumigación), para las regiones cultivadas. Se presume que algunos fungicidas y fertilizantes utilizados poseen concentraciones de azufre que

escurren por acción de la precipitación pluvial a la región de muestreo antes mencionada.

RECOMENDACIONES

1. Cuidar del manejo y transporte de las muestras y tomar la mayor cantidad de datos en el lugar para tener una mejor referencia de las condiciones en las cuales se llevarán a cabo los muestreos para una futura investigación.
2. Tomar en cuenta las condiciones geomorfológicas del lugar y condiciones de temperatura al momento de su traslado, con el objeto de no variar las condiciones originales de las muestras.
3. Mejorar la precisión en los análisis de las concentraciones de aniones y cationes, debido a que de ello dependerá la exactitud del mismo, al aumentar la precisión de los datos generados en la determinación espacial del frente de intrusión marina en un acuífero costero.
4. Llevar a cabo estudios aplicados a las aguas subterráneas contenidas dentro de los mantos freáticos (pozo), que conforman el acuífero costero en el río Suchiate, ya que es un importante factor para la determinación del proceso de recarga o descarga hídrica del acuífero en las diferentes épocas del año (seca, húmeda lluviosa).
5. Tomar el presente estudio, como punto de partida para el análisis de intrusión marina en los diferentes ríos que conforman la vertiente del Pacífico del país, con fines académicos y de beneficio para las diferentes actividades que se lleven a cabo en la región del Océano Pacífico.

6. Conocer las actividades que se lleven a cabo alrededor del área del cuerpo de agua a evaluar, las cuales puedan alterar las concentraciones iónicas del agua, tales como la agricultura, industria y antropogénica

BIBLIOGRAFÍA

1. CUSTODIO, Emilio / LLAMAS, Manuel. *Hidrología subterránea. Tomo 1*. 2a ed. Barcelona, Ediciones Omega, S.A. 1976. 1 194 p.
2. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Principales ríos de Guatemala. [en línea]. [http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/rios%20de%20guate.htm#PRINCIPALES RÍOS DE GUATEMALA](http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/rios%20de%20guate.htm#PRINCIPALES_RÍOS_DE_GUATEMALA)>. [Consulta: 25 de octubre de 2013].
3. KRIEGER, Robert. Una introducción a la dureza del agua. [en línea]. <http://www.itacanet.org/esp/agua/Seccion%206%20Tratamiento%20de%20agua/durezaagua/Agua%20dura.pdf>>. [Consulta: 23 de octubre de 2013].
4. LINSLEY, Ray K. Jr. / KOHLER, Max A. / PAULUS, Joseph L.H. *Hidrología para ingenieros*. 2a ed. Colombia: McGraw Hill Latinoamericana, S.A. 1975. 357 p.
5. LOPEZ GUETA, Juan Antonio / GÓMEZ GÓMEZ, Juan de Dios. La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles. [en línea]. www.raco.cat/index.php/ECT/article/download/121417/167867>. [Consulta: 23 de octubre de 2013].

6. MONSALVE SÁENZ, Germán. *Hidrología en la ingeniería*. 1a ed. Colombia: Editorial escuela colombiana de ingenieros, 1995. 360 p.
7. MUCH, Zenón. *Hidroquímica*. Apuntes de curso de especialización, Clasificaciones hidroquímicas. Cuba: 2005. 26 p.
8. SUAREZ B. Gustavo A. *Cuencas hidrográficas de Guatemala*. 1ª ed. Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2011. 49 p.
9. Universidad Jaume I de Castellón. Acuífero costero, proceso de salinización. [en línea]. [http://www. agua.uji. es/pdf/ PRESRH22. pdf](http://www.agua.uji.es/pdf/PRESRH22.pdf)>. [Consulta: 11 de octubre de 2013].
10. VILLEGAS YEPES, Pedro Pablo. Los diagramas más utilizados para la interpretación de análisis hidroquímicos. [en línea]. <http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>>. [Consulta: 11 de octubre de 2013].
11. WAYNE W, Daniel. *Bioestadística, base para el análisis de las ciencias de la salud*. 3a ed. México: Limusa, 1991. 923 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Estación seca 1, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	52,1	20	2,61	3,87
Mg ⁺²	24,37	12,15	2,01	2,98
Na ⁺	1 400,01	23	60,87	90,49
K ⁺	69,81	39	1,79	2,66
Suma			67,27	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	80	61	1,31	29,08
Cl ⁻	11,5	35,5	0,32	7,18
SO ₄ ⁻²	138	48	2,88	63,74
Suma			4,51	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Segunda fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	31,26	20	1,56	8,44
Mg ⁺²	47,28	12,15	3,89	21,02
Na ⁺	290,03	23	12,61	68,11
K ⁺	17,55	39	0,45	2,43
Suma			18,51	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	70	61	1,15	4,07
Cl ⁻	890	35,5	25,07	88,98
SO ₄ ⁻²	94	48	1,96	6,95
Suma			28,18	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	23,25	20	1,16	8,45
Mg ⁺²	29,73	12,15	2,45	17,80
Na ⁺	224,94	23	9,78	71,13
K ⁺	14,04	39	0,36	2,62
		Suma	13,75	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	64	61	1,05	6,92
Cl ⁻	466	35,5	13,13	86,62
SO ₄ ⁻²	47	48	0,98	6,46
		Suma	15,16	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	4	8	8	7
Mg ⁺²	3	21	18	14
K ⁺ + Na ⁺	93	71	74	79

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	29	4	7	13
Cl ⁻	7	89	87	61
SO ₄ ⁻²	64	7	6	26

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Estación seca 2, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	18,44	20	0,92	24,62
Mg ⁺²	10,24	12,15	0,84	22,51
Na ⁺	42,55	23	1,85	49,40
K ⁺	5,07	39	0,13	3,47
Suma			3,74	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	62	61	1,02	42,38
Cl ⁻	35	35,5	0,99	41,11
SO ₄ ⁻²	19	48	0,40	16,51
Suma			2,40	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Segunda fase de muestreo**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	19,24	20	0,96	16,72
Mg ⁺²	10,71	12,15	0,88	15,32
Na ⁺	85,1	23	3,70	64,31
K ⁺	8,19	39	0,21	3,65
Suma			5,75	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	68	61	1,11	24,05
Cl ⁻	106,5	35,5	3,00	64,72
SO ₄ ⁻²	25	48	0,52	11,24
Suma			4,64	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	23,25	20	1,16	18,79
Mg ⁺²	19,48	12,15	1,60	25,92
Na ⁺	72,45	23	3,15	50,92
K ⁺	10,53	39	0,27	4,36
		Suma	6,19	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	120	61	1,97	37,64
Cl ⁻	110,5	35,5	3,11	59,56
SO ₄ ⁻²	7	48	0,15	2,79
		Suma	5,23	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	25	17	19	20
Mg ⁺²	23	15	26	21
K ⁺ + Na ⁺	53	68	55	59

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	42	24	38	35
Cl ⁻	41	65	60	55
SO ₄ ⁻²	17	11	3	14

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Estación seca 3, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	28,06	20	1,40	41,43
Mg ⁺²	16,44	12,15	1,35	39,96
Na ⁺	12,42	23	0,54	15,95
K ⁺	3,51	39	0,09	2,66
Suma			3,39	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	60	61	0,98	80,95
Cl ⁻	0,08	35,5	0,00	0,19
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	18,86
Suma			1,22	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Segunda fase de muestreo**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	16,03	20	0,80	38,12
Mg ⁺²	7,79	12,15	0,64	30,49
Na ⁺	12,42	23	0,54	25,68
K ⁺	4,68	39	0,12	5,71
Suma			2,10	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	62	61	1,02	58,71
Cl ⁻	16,5	35,5	0,46	26,85
SO ₄ ⁻²	12	48	0,25	14,44
Suma			1,73	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,83	20	0,64	36,40
Mg ⁺²	5,84	12,15	0,48	27,28
Na ⁺	11,96	23	0,52	29,51
K ⁺	4,68	39	0,12	6,81
Suma			1,76	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	46	61	0,75	55,30
Cl ⁻	13,5	35,5	0,38	27,89
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	16,81
Suma			1,36	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	41	38	36	39
Mg ⁺²	40	30	27	33
K ⁺ + Na ⁺	19	31	36	29

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	81	59	55	65
Cl ⁻	0	27	28	27
SO ₄ ⁻²	19	14	17	16

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Estación seca 4, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	24,05	20	1,20	41,82
Mg ⁺²	14,01	12,15	1,15	40,10
Na ⁺	9,89	23	0,43	14,95
K ⁺	3,51	39	0,09	3,13
Suma			2,88	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	58	61	0,95	31,36
Cl ⁻	65	35,5	1,83	60,39
SO ₄ ⁻²	12	48	0,25	8,25
Suma			3,03	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. Segunda fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	16,03	20	0,80	42,60
Mg ⁺²	6,32	12,15	0,52	27,64
Na ⁺	9,89	23	0,43	22,85
K ⁺	5,07	39	0,13	6,91
Suma			1,88	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	66	61	1,08	62,92
Cl ⁻	14,5	35,5	0,41	23,75
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	13,33
Suma			1,72	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	14,43	20	0,72	55,45
Mg ⁺²	4,37	12,15	0,36	27,64
Na ⁺	2,07	23	0,09	6,92
K ⁺	5,07	39	0,13	9,99
Suma			1,30	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	54	61	0,89	58,67
Cl ⁻	14	35,5	0,39	26,14
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	15,19
Suma			1,51	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. Concentraciones promedio en %meq/

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	42	43	55	47
Mg ⁺²	40	28	28	32
K ⁺ + Na ⁺	18	30	17	22

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	31	63	59	61
Cl ⁻	60	24	26	25
SO ₄ ⁻²	8	13	15	14

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Estación seca 5, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	11,22	20	0,56	32,74
Mg ⁺²	6,23	12,15	0,51	29,92
Na ⁺	12,42	23	0,54	31,51
K ⁺	3,9	39	0,10	5,84
Suma			1,71	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	64	61	1,05	71,46
Cl ⁻	6	35,5	0,17	11,51
SO ₄ ⁻²	12	48	0,25	17,03
Suma			1,47	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Segunda fase de muestreo**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	15,23	20	0,76	43,22
Mg ⁺²	5,35	12,15	0,44	24,99
Na ⁺	9,89	23	0,43	24,41
K ⁺	5,07	39	0,13	7,38
Suma			1,76	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	64	61	1,05	65,18
Cl ⁻	12,5	35,5	0,35	21,88
SO ₄ ⁻²	10	48	0,21	12,94
Suma			1,61	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,83	20	0,64	51,26
Mg ⁺²	4,86	12,15	0,40	31,96
Na ⁺	2,07	23	0,09	7,19
K ⁺	4,68	39	0,12	9,59
Suma			1,25	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	50	61	0,82	56,80
Cl ⁻	14	35,5	0,39	27,33
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	15,88
Suma			1,44	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	33	43	51	42
Mg ⁺²	30	25	32	29
K ⁺ + Na ⁺	37	32	17	29

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	71	65	57	64
Cl ⁻	12	22	27	20
SO ₄ ⁻²	17	13	16	15

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. **Estación seca 6, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	10,42	20	0,52	31,75
Mg ⁺²	5,71	12,15	0,47	28,64
Na ⁺	12,42	23	0,54	32,91
K ⁺	4,29	39	0,11	6,70
Suma			1,64	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	58	61	0,95	70,48
Cl ⁻	6	35,5	0,17	12,53
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	16,99
Suma			1,35	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. **Segunda fase de muestreo**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,84	20	0,64	38,17
Mg ⁺²	5,83	12,15	0,48	28,53
Na ⁺	9,89	23	0,43	25,57
K ⁺	5,07	39	0,13	7,73
Suma			1,68	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	62	61	1,016	60,931
Cl ⁻	15	35,5	0,423	25,330
SO ₄ ⁻²	11	48	0,229	13,738
Suma			1,668	100,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,83	20	0,64	52,97
Mg ⁺²	4,37	12,15	0,36	29,70
Na ⁺	2,07	23	0,09	7,43
K ⁺	4,68	39	0,12	9,91
Suma			1,21	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	52	61	0,85	57,75
Cl ⁻	14	35,5	0,39	26,72
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	15,53
Suma			1,48	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	32	38	53	41
Mg ⁺²	29	29	30	29
K ⁺ + Na ⁺	40	33	17	30

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	70	61	58	63
Cl ⁻	13	25	27	22
SO ₄ ⁻²	17	14	16	15

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Estación seca 7, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	13,63	20	0,68	36,83
Mg ⁺²	7,64	12,15	0,63	33,98
Na ⁺	9,89	23	0,43	23,24
K ⁺	4,29	39	0,11	5,94
Suma			1,85	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	56	61	0,92	68,29
Cl ⁻	7	35,5	0,20	14,67
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	17,05
Suma			1,34	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26. **Segunda fase de muestreo**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	16,03	20	0,80	43,06
Mg ⁺²	4,86	12,15	0,40	21,49
Na ⁺	12,42	23	0,54	29,01
K ⁺	4,68	39	0,12	6,45
Suma			1,86	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	60	61	0,98	62,01
Cl ⁻	14	35,5	0,39	24,86
SO ₄ ⁻²	10	48	0,21	13,13
Suma			1,59	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 27. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,02	20	0,60	49,19
Mg ⁺²	4,87	12,15	0,40	32,81
Na ⁺	2,07	23	0,09	7,37
K ⁺	5,07	39	0,13	10,64
Suma			1,22	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	52	61	0,85	58,31
Cl ⁻	13,5	35,5	0,38	26,01
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	15,68
Suma			1,46	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 28. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	37	43	49	43
Mg ⁺²	34	21	33	29
K ⁺ + Na ⁺	29	35	18	28

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	68	62	58	63
Cl ⁻	15	25	26	22
SO ₄ ⁻²	17	13	16	15

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 29. **Estación seca 8, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	13,63	20	0,68	37,08
Mg ⁺²	7,61	12,15	0,63	34,08
Na ⁺	9,89	23	0,43	23,40
K ⁺	3,9	39	0,10	5,44
Suma			1,84	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	60	61	0,98	71,92
Cl ⁻	5,5	35,5	0,15	11,33
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	16,76
Suma			1,37	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 30. **Segunda fase de muestreo**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	15,23	20	0,76	43,97
Mg ⁺²	5,35	12,15	0,44	25,43
Na ⁺	9,89	23	0,43	24,83
K ⁺	3,9	39	0,10	5,77
Suma			1,73	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	64	61	1,05	61,68
Cl ⁻	15	35,5	0,42	24,84
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	13,47
Suma			1,70	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 31. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,83	20	0,64	47,83
Mg ⁺²	5,83	12,15	0,48	35,77
Na ⁺	2,07	23	0,09	6,71
K ⁺	5,07	39	0,13	9,69
		Suma	1,34	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	52	61	0,85	58,04
Cl ⁻	13	35,5	0,37	24,93
SO ₄ ⁻²	12	48	0,25	17,02
		Suma	1,47	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 32. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	37	44	48	43
Mg ⁺²	34	25	36	32
K ⁺ + Na ⁺	29	31	16	25

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	72	62	58	64
Cl ⁻	11	25	25	20
SO ₄ ⁻²	17	13	17	16

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 33. **Estación húmeda 1, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	9,62	20	0,48	5,64
Mg ⁺²	17,06	12,15	1,40	16,45
Na ⁺	124,89	23	5,43	63,62
K ⁺	47,58	39	1,22	14,29
Suma			8,54	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	36	61	0,59	8,20
Cl ⁻	211,5	35,5	5,96	82,82
SO ₄ ⁻²	31	48	0,65	8,98
Suma			7,19	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 34. **Segunda fase de muestreo**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	16,03	20	0,80	8,12
Mg ⁺²	12,18	12,15	1,00	10,15
Na ⁺	5,52	23	0,24	2,43
K ⁺	305,37	39	7,83	79,30
Suma			9,87	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	52	61	0,85	15,23
Cl ⁻	150	35,5	4,23	75,47
SO ₄ ⁻²	25	48	0,52	9,30
Suma			5,60	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 35. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	16,03	20	0,80	10,84
Mg ⁺²	17,05	12,15	1,40	18,98
Na ⁺	115	23	5,00	67,62
K ⁺	7,41	39	0,19	2,57
		Suma	7,39	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	46	61	0,75	8,05
Cl ⁻	280	35,5	7,89	84,17
SO ₄ ⁻²	35	48	0,73	7,78
		Suma	9,37	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 36. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	6	8	11	8
Mg ⁺²	16	10	19	15
K ⁺ + Na ⁺	78	82	70	77

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	8	15	8	10
Cl ⁻	83	75	84	81
SO ₄ ⁻²	9	9	8	9

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 37.

Estación húmeda 2, Primera fase de muestreo

% de aniones y cationes para el diagrama de Piper

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	6,41	20	0,32	28,83
Mg ⁺²	5,36	12,15	0,44	39,68
Na ⁺	6,9	23	0,30	26,99
K ⁺	1,95	39	0,05	4,50
Suma			1,11	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	26	61	0,43	40,06
Cl ⁻	14,5	35,5	0,41	38,39
SO ₄ ⁻²	11	48	0,23	21,54
Suma			1,06	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 38.

Segunda fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,83	20	0,64	21,57
Mg ⁺²	10,23	12,15	0,84	28,32
Na ⁺	2,3	23	0,10	3,36
K ⁺	54,21	39	1,39	46,75
Suma			2,97	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	56	61	0,92	38,59
Cl ⁻	41,5	35,5	1,17	49,14
SO ₄ ⁻²	14	48	0,29	12,26
Suma			2,38	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 39. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,83	20	0,64	31,73
Mg ⁺²	6,32	12,15	0,52	25,73
Na ⁺	17,94	23	0,78	38,58
K ⁺	3,12	39	0,08	3,96
		Suma	2,02	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	44	61	0,72	40,50
Cl ⁻	28	35,5	0,79	44,29
SO ₄ ⁻²	13	48	0,27	15,21
		Suma	1,78	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 40. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	29	22	32	27
Mg ⁺²	40	28	26	31
K ⁺ + Na ⁺	31	50	43	41

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	40	39	41	40
Cl ⁻	38	49	44	44
SO ₄ ⁻²	22	12	15	14

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 41. **Estación húmeda 3, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	6,41	20	0,32	32,01
Mg ⁺²	4,87	12,15	0,40	40,03
Na ⁺	5,06	23	0,22	21,97
K ⁺	2,34	39	0,06	5,99
Suma			1,00	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	30	61	0,49	50,44
Cl ⁻	10,5	35,5	0,30	30,33
SO ₄ ⁻²	9	48	0,19	19,23
Suma			0,98	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 42. **Segunda fase de muestreo**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,83	20	0,64	40,55
Mg ⁺²	5,84	12,15	0,48	30,38
Na ⁺	1,61	23	0,07	4,42
K ⁺	15,21	39	0,39	24,65
Suma			1,58	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	44	61	0,72	60,93
Cl ⁻	10,5	35,5	0,30	24,99
SO ₄ ⁻²	8	48	0,17	14,08
Suma			1,18	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 43. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	11,22	20	0,56	37,57
Mg ⁺²	6,83	12,15	0,56	37,65
Na ⁺	6,9	23	0,30	20,09
K ⁺	2,73	39	0,07	4,69
		Suma	1,49	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	40	61	0,66	29,12
Cl ⁻	50	35,5	1,41	62,55
SO ₄ ⁻²	9	48	0,19	8,33
		Suma	2,25	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 44. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	32	41	38	37
Mg ⁺²	40	30	38	36
K ⁺ + Na ⁺	28	29	25	27

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	50	61	29	47
Cl ⁻	30	25	63	39
SO ₄ ⁻²	19	14	8	14

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 45.

ESTACIÓN HÚMEDA 4, Primera fase de muestreo
% de aniones y cationes para el diagrama de Piper

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	5,61	20	0,28	29,49
Mg ⁺²	4,87	12,15	0,40	42,13
Na ⁺	5,06	23	0,22	23,13
K ⁺	1,95	39	0,05	5,26
Suma			0,95	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	28	61	0,46	46,28
Cl ⁻	13	35,5	0,37	36,92
SO ₄ ⁻²	8	48	0,17	16,80
Suma			0,99	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 46.

Segunda fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	11,22	20	0,56	34,59
Mg ⁺²	5,84	12,15	0,48	29,64
Na ⁺	1,38	23	0,06	3,70
K ⁺	20,28	39	0,52	32,07
Suma			1,62	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	46	61	0,75	59,24
Cl ⁻	12,5	35,5	0,35	27,66
SO ₄ ⁻²	8	48	0,17	13,09
Suma			1,27	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 47. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	11,22	20	0,56	43,44
Mg ⁺²	4,38	12,15	0,36	27,91
Na ⁺	6,9	23	0,30	23,23
K ⁺	2,73	39	0,07	5,42
		Suma	1,29	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	46	61	0,75	59,59
Cl ⁻	11,5	35,5	0,32	25,60
SO ₄ ⁻²	9	48	0,19	14,82
		Suma	1,27	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 48. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	29	35	43	36
Mg ⁺²	42	30	28	33
K ⁺ + Na ⁺	28	36	29	31

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	46	59	60	55
Cl ⁻	37	28	26	30
SO ₄ ⁻²	17	13	15	15

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 49. **Estación húmeda 5, Primera fase de muestreo**
% de aniones y cationes para el diagrama de Piper

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	6,41	20	0,32	33,68
Mg ⁺²	3,9	12,15	0,32	33,74
Na ⁺	5,52	23	0,24	25,22
K ⁺	2,73	39	0,07	7,36
Suma			0,95	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	28	61	0,46	49,06
Cl ⁻	11	35,5	0,31	33,12
SO ₄ ⁻²	8	48	0,17	17,81
Suma			0,94	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 50. **Segunda fase de muestreo**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,02	20	0,60	37,06
Mg ⁺²	5,84	12,15	0,48	29,64
Na ⁺	1,38	23	0,06	3,70
K ⁺	18,72	39	0,48	29,60
Suma			1,62	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	44	61	0,72	57,51
Cl ⁻	13	35,5	0,37	29,20
SO ₄ ⁻²	8	48	0,17	13,29
Suma			1,25	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 51. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	11,2	20	0,56	39,70
Mg ⁺²	5,84	12,15	0,48	34,07
Na ⁺	6,9	23	0,30	21,27
K ⁺	2,73	39	0,07	4,96
		Suma	1,41	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	42	61	0,69	58,39
Cl ⁻	11,5	35,5	0,32	27,47
SO ₄ ⁻²	8	48	0,17	14,13
		Suma	1,18	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 52. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	34	37	40	37
Mg ⁺²	34	30	34	32
K ⁺ + Na ⁺	33	33	26	31

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	49	58	58	55
Cl ⁻	33	29	27	30
SO ₄ ⁻²	18	13	14	15

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 53.

Estación húmeda 6, Primera fase de muestreo

% de aniones y cationes para el diagrama de Piper

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	6,41	20	0,32	32,34
Mg ⁺²	4,38	12,15	0,36	36,38
Na ⁺	5,52	23	0,24	24,22
K ⁺	2,73	39	0,07	7,06
Suma			0,99	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	30	61	0,49	51,15
Cl ⁻	11,5	35,5	0,32	33,69
SO ₄ ⁻²	7	48	0,15	15,17
Suma			0,96	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 54.

Segunda fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,83	20	0,64	45,47
Mg ⁺²	3,88	12,15	0,32	22,63
Na ⁺	1,38	23	0,06	4,25
K ⁺	15,21	39	0,39	27,64
Suma			1,41	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	44	61	0,721	56,573
Cl ⁻	13	35,5	0,366	28,721
SO ₄ ⁻²	9	48	0,188	14,706
Suma			1,275	100,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 55. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,02	20	0,60	39,74
Mg ⁺²	6,82	12,15	0,56	37,12
Na ⁺	6,44	23	0,28	18,51
K ⁺	2,73	39	0,07	4,63
		Suma	1,51	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	40	61	0,66	54,22
Cl ⁻	13	35,5	0,37	30,28
SO ₄ ⁻²	9	48	0,19	15,50
		Suma	1,21	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 56. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	32	45	40	39
Mg ⁺²	36	23	37	32
K ⁺ + Na ⁺	31	32	23	29

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	51	57	54	54
Cl ⁻	34	29	30	31
SO ₄ ⁻²	15	15	16	15

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 57. Estación húmeda 7, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	6,41	20	0,32	32,34
Mg ⁺²	4,38	12,15	0,36	36,38
Na ⁺	5,52	23	0,24	24,22
K ⁺	2,73	39	0,07	7,06
Suma			0,99	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	34	61	0,56	54,65
Cl ⁻	10,5	35,5	0,30	29,00
SO ₄ ⁻²	8	48	0,17	16,34
Suma			1,02	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 58. Segunda fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,02	20	0,60	39,50
Mg ⁺²	4,38	12,15	0,36	23,69
Na ⁺	1,38	23	0,06	3,94
K ⁺	19,5	39	0,50	32,86
Suma			1,52	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	44	61	0,72	58,51
Cl ⁻	11,5	35,5	0,32	26,28
SO ₄ ⁻²	9	48	0,19	15,21
Suma			1,23	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 59. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	12,02	20	0,60	40,28
Mg ⁺²	6,33	12,15	0,52	34,92
Na ⁺	6,9	23	0,30	20,11
K ⁺	2,73	39	0,07	4,69
		Suma	1,49	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	42	61	0,69	57,38
Cl ⁻	11,5	35,5	0,32	27,00
SO ₄ ⁻²	9	48	0,19	15,63
		Suma	1,20	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 60. Concentraciones promedio en %meq/l

Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	32	40	40	37
Mg ⁺²	36	24	35	32
K ⁺ + Na ⁺	31	37	25	31

Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	55	59	57	57
Cl ⁻	29	26	27	27
SO ₄ ⁻²	16	15	16	16

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 61. **Estación húmeda 8, Primera fase de muestreo % de aniones y cationes para el diagrama de Piper**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	6,41	20	0,32	30,19
Mg ⁺²	5,36	12,15	0,44	41,55
Na ⁺	5,52	23	0,24	22,61
K ⁺	2,34	39	0,06	5,65
Suma			1,06	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	32	61	0,52	51,67
Cl ⁻	11,5	35,5	0,32	31,91
SO ₄ ⁻²	8	48	0,17	16,42
Suma			1,02	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 62. **Segunda fase de muestreo**

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	11,22	20	0,56	31,12
Mg ⁺²	8,28	12,15	0,68	37,81
Na ⁺	1,38	23	0,06	3,33
K ⁺	19,5	39	0,50	27,74
Suma			1,80	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	44	61	0,72	56,90
Cl ⁻	12	35,5	0,34	26,67
SO ₄ ⁻²	10	48	0,21	16,43
Suma			1,27	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 63. Tercera fase de muestreo

Cationes

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
Ca ⁺²	10,42	20	0,52	41,63
Mg ⁺²	4,38	12,15	0,36	28,81
Na ⁺	6,9	23	0,30	23,97
K ⁺	2,73	39	0,07	5,59
Suma			1,25	100,00

Aniones

Parámetro	Concentración (mg/l)	Peso de Un meq	Concentración en meq/l	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	40	61	0,66	54,22
Cl ⁻	13	35,5	0,37	30,28
SO ₄ ⁻²	9	48	0,19	15,50
Suma			1,21	100,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 64. Concentraciones promedio en %meq/l

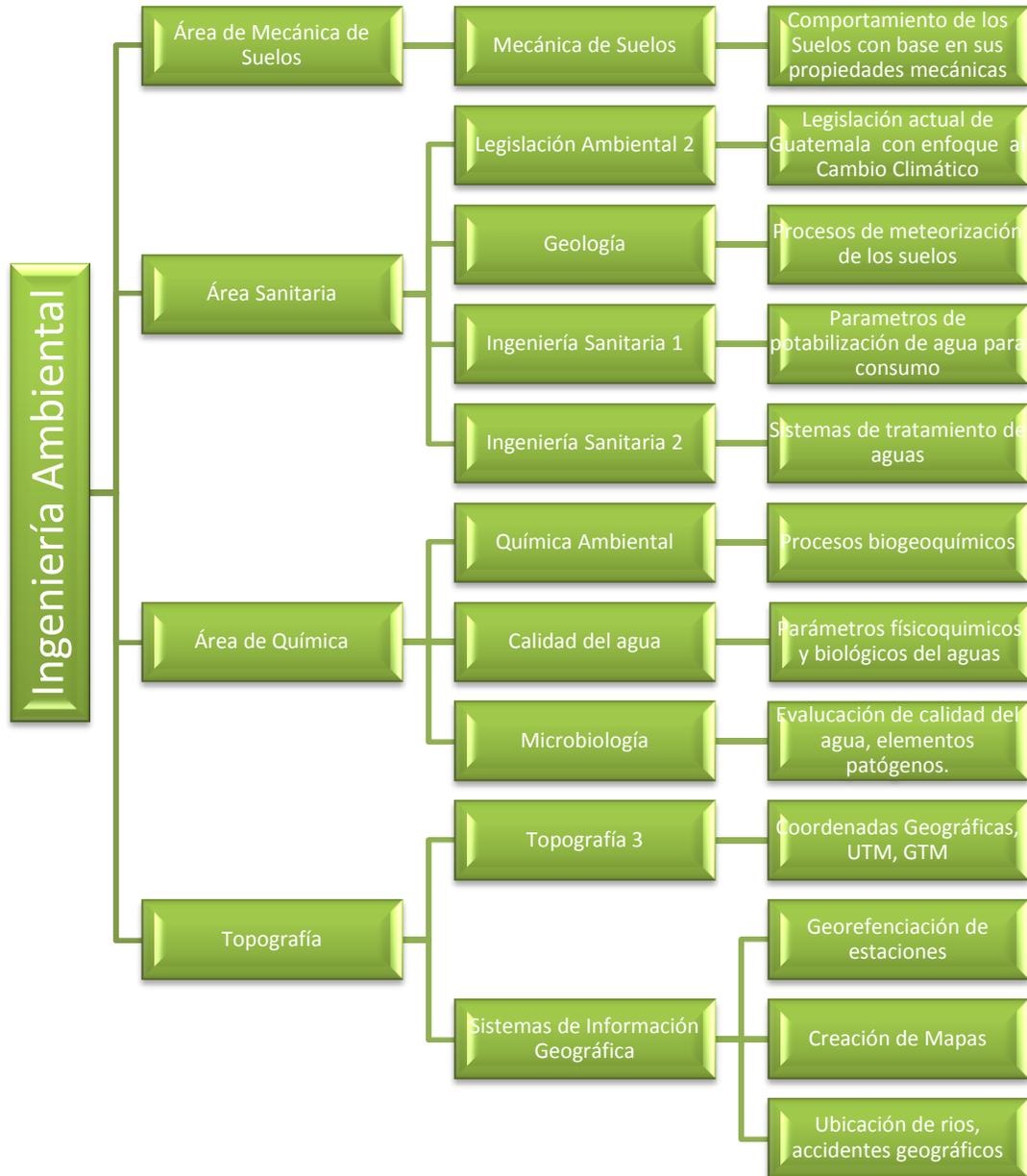
Cationes

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
Ca ⁺²	30	31	42	34
Mg ⁺²	42	38	29	36
K ⁺ + Na ⁺	28	31	30	30

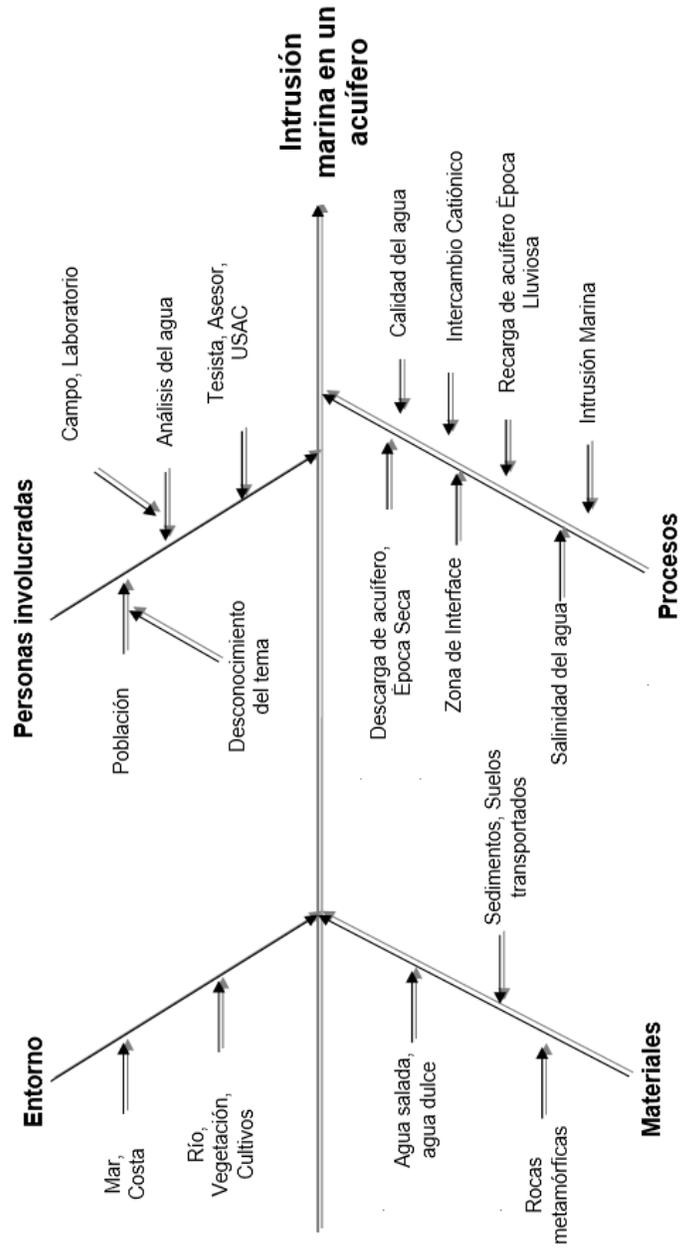
Aniones

Parámetro	Concentración Primera fase	Concentración Segunda fase	Concentración Tercera fase	Concentración en (%)
HCO ₃ ⁻	52	57	54	54
Cl ⁻	32	27	30	30
SO ₄ ⁻²	16	16	16	16

Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados CII FIUSAC, Primera fase/época seca



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ORDEN DE TRABAJO 32471

<p>INTERESADO: <u>Mario Raúl Pacay García,</u> <u>Carné No. 2008 15572</u></p> <p>RECOLECTADA POR: <u>Interesado</u></p> <p>LUGAR DE RECOLECCIÓN: <u>Río Suchiate</u></p> <p>FUENTE: <u>Río</u></p> <p>DEPARTAMENTO: <u>Ocos</u></p> <p>MUNICIPIO: <u>San Marcos</u></p>	<p>PROYECTO: <u>TÉSIS "DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN"</u></p> <p>DEPENDENCIA: <u>Facultad de Ingeniería/Escuela de Ingeniería Química/USAC</u></p> <p>FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LAB: <u>2014-02-03; 16 h 30 min.</u></p> <p>CONDICIONES DE TRANSPORTE: <u>Con Refrigeración</u></p>
--	---

DETERMINACIONES AISLADAS

INFORME No.	FECHA Y HORA DE RECOLECCIÓN	CLORUROS (mg/L)	SULFATOS (mg/L)	CALCIO (mg/L)	MAGNESIO (mg/L)	ALCALINIDAD (mg/L)
25276	2014-02-02; 08h49min.	11,50	138,00	52,10	24,37	80,00
25277	2014-02-02; 09h42min	35,00	19,00	18,44	10,24	62,00
25278	2014-02-02; 10h00min	08,00	11,00	28,06	16,44	60,00
25279	2014-02-02; 10h22min	65,00	12,00	24,05	14,01	58,00
25280	2014-02-02; 10h36min	06,00	12,00	11,22	06,23	64,00
25281	2014-02-02; 10h41min	06,00	11,00	10,42	05,71	58,00
25282	2014-02-02; 10h55min	07,00	11,00	13,63	07,64	56,00
25283	2014-02-02; 11h05min	05,50	11,00	13,63	07,61	60,00

Guatemala, 17 de febrero 2014

Vo.Bo.
Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC


TELMA MARICELA CANO MORALES
Ing. Química Col. No. 420
4. St. de Ingeniería Sanitaria
 jefe Técnico Laboratorio




FACULTAD DE INGENIERIA—USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina"
CII FIUSAC.

Anexo 2.

Resultados UVIGER FAUSAC, Primera fase/época seca

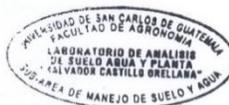


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 FACULTAD DE AGRONOMÍA
 LABORATORIO DE SUELO-PLANTA-AGUA "SALVADOR CASTILLO ORELLANA"



INTERESADO: MARIO RAUL PACAY
PROCEDENCIA: RIO SUCHIATE, OCOS, SAN MARCOS
FECHA DE INGRESO: 3/2/2014

IDENTIFICACION	Meq/litro	
	Na	K
ESTACION 1	60.87	1.79
ESTACION 2	1.85	0.13
ESTACION 3	0.54	0.09
ESTACION 4	0.43	0.09
ESTACION 5	0.54	0.10
ESTACION 6	0.54	0.11
ESTACION 7	0.43	0.11
ESTACION 8	0.43	0.10



CAMPUS CENTRAL, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 EDIFICIO T-8, SEGUNDO NIVEL, OFICINA B-9, CIUDAD UNIVERSITARIA, ZONA 12, GUATEMALA.
 CÓDIGO POSTAL 01012. APARTADO POSTAL 1545. TEL.: (502) 2443 9500, EXTENSION: 1768. FAX: (502) 2476 9758.

Fuente: Unidad de Vinculación y Gestión de Recursos, FAUSAC.

Anexo 3.

Resultados CII FIUSAC, Segunda fase/época seca



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ORDEN DE TRABAJO 32520

INTERESADO:	<u>Mario Raúl Pacay García,</u> Carné No. 2008 15572	PROYECTO:	<u>TÉSIS "DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN</u>
RECOLECTADA POR:	Interesado	DEPENDENCIA:	Facultad de Ingeniería/Escuela de Ingeniería Química/USAC
LUGAR DE RECOLECCIÓN:	Río Suchiate	FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LAB:	2014-02-23; 14 h 22 min.
FUENTE:	Río	CONDICIONES DE: TRANSPORTE	Con Refrigeración
DEPARTAMENTO:	Ocos		
MUNICIPIO	San Marcos		

DETERMINACIONES AISLADAS

INFORME No.	FECHA Y HORA DE RECOLECCIÓN	CLORUROS (mg/L)	SULFATOS (mg/L)	CALCIO (mg/L)	MAGNESIO (mg/L)	ALCALINIDAD (mg/L)
25517	2014-02-23; 08h24min.	890,00	94,00	31,26	47,28	70,00
25518	2014-02-23; 08h51min.	106,5	25,00	19,24	10,71	68,00
25519	2014-02-23; 09h07min.	16,50	12,00	16,03	07,79	62,00
25520	2014-02-23; 09h27min.	14,50	11,00	16,03	06,32	66,00
25521	2014-02-23; 09h38min.	12,50	10,00	15,23	05,35	64,00
25522	2014-02-23; 10h05min.	15,00	11,00	12,84	05,83	62,00
25523	2014-02-23; 10h20min.	14,00	10,00	16,03	04,86	60,00
25524	2014-02-23; 10h35min.	15,00	11,00	15,23	05,35	64,00

Guatemala, 04 de marzo 2014

Vo.Bo.

Inga. Telma Mariela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Zenaida Moch Caminos
Ing. Química Col. No. 420
4^a Sección Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115; Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina"
CII FIUSAC.

Anexo 4.

Resultados UVIGER FAUSAC, Segunda fase/época seca

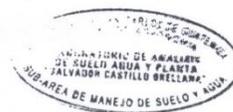


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
LABORATORIO DE SUELO-PLANTA-AGUA "SALVADOR CASTILLO ORELLANA"



INTERESADO: MARIO RAUL PACAY
PROCEDENCIA: RIO SUCHIATE, OCOS, SAN MARCOS
FECHA DE INGRESO: 24/2/2014

IDENTIFICACION	Meq/litro	
	Na	K
ESTACION 1	12.61	0.45
ESTACION 2	3.70	0.21
ESTACION 3	0.54	0.12
ESTACION 4	0.43	0.13
ESTACION 5	0.43	0.13
ESTACION 6	0.43	0.13
ESTACION 7	0.54	0.12
ESTACION 8	0.43	0.10



CAMPUS CENTRAL, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
EDIFICIO UVIGER, TERCER NIVEL, CIUDAD UNIVERSITARIA, ZONA 12, GUATEMALA
CODIGO POSTAL 01012, APARTADO POSTAL 1545, TEL: (502)24189308, (502) 24188000 EXT 1562 Ó 1769

Fuente: Unidad de Vinculación y Gestión de Recursos, FAUSAC.

Anexo 5.

Resultados CII FIUSAC, Tercera fase/época seca



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ORDEN DE TRABAJO 32732

INTERESADO:	<u>Mario Raúl Pacay García,</u> Carné No. 2008 15572	PROYECTO:	TÉSIS "DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN"
RECOLECTADA POR:	Interesado	DEPENDENCIA:	Facultad de Ingeniería/Escuela de Ingeniería Química/USAC
LUGAR DE RECOLECCIÓN:	Río Suchiate No. 1 al No. 8	FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LAB:	2014-03-24; 14 h 37 min.
FUENTE:	Río	CONDICIONES DE TRANSPORTE:	Con Refrigeración
DEPARTAMENTO:	Ocos		
MUNICIPIO:	San Marcos		

DETERMINACIONES AISLADAS

INFORME No.	FECHA Y HORA DE RECOLECCIÓN	CLORUROS (mg/L)	SULFATOS (mg/L)	CALCIO (mg/L)	MAGNESIO (mg/L)	ALCALINIDAD (mg/L)
25583	2014-03-23; 08h32min.	466,00	47,00	23,25	29,73	64,00
25584	2014-03-23; 09h05min.	110,50	07,00	23,25	19,48	120,00
25585	2014-03-23; 09h19min.	13,5	11,00	12,83	05,84	46,00
25586	2014-03-23; 09h31min.	14,00	11,00	14,43	04,37	54,00
25587	2014-03-23; 09h41min.	14,00	11,00	12,83	04,86	50,00
25588	2014-03-23; 10h34min.	14,00	11,00	12,83	04,37	52,00
25589	2014-03-23; 09h54min.	13,50	11,00	12,02	04,87	52,00
25590	2014-03-23; 10h13min.	13,00	12,00	12,83	05,83	52,00

Guatemala, 02 de abril 2014

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Z. Oscar Puch Santos
Ingeniero Químico Col. No. 420
CII en Ingeniería Sanitaria
Laboratorio Técnico



FACULTAD DE INGENIERIA—USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115; Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina"
CII FIUSAC.

Anexo 6.

Resultados UVIGER FAUSAC, Tercera fase/época seca

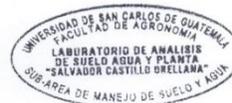


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
LABORATORIO DE SUELO-PLANTA-AGUA "SALVADOR CASTILLO ORELLANA"



INTERESADO: MARIO RAUL PACAY
PROCEDENCIA: RIO SUCHIATE, OCOS, SAN MARCOS
FECHA DE INGRESO: 24/3/2014

IDENTIFICACION	Meq/litro	
	Na	K
ESTACION 1	9.78	0.36
ESTACION 2	3.15	0.27
ESTACION 3	0.52	0.12
ESTACION 4	0.09	0.13
ESTACION 5	0.09	0.12
ESTACION 6	0.09	0.12
ESTACION 7	0.09	0.13
ESTACION 8	0.09	0.13



CAMPUS CENTRAL, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
EDIFICIO UVIGER, TERCER NIVEL, CIUDAD UNIVERSITARIA, ZONA 12, GUATEMALA
CODIGO POSTAL 01012, APARTADO POSTAL 1545; TEL: (502)24189308, (502) 24188000 EXT 1562 Q 1769

Fuente: Unidad de Vinculación y Gestión de Recursos, FAUSAC.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



ORDEN DE TRABAJO 33110

No. 2077

<p>INTERESADO: <u>Mario Raúl Pacay García,</u> Carné No. 2008 15572</p> <p>RECOLECTADA POR: <u>Interesado</u></p> <p>LUGAR DE RECOLECCIÓN: <u>Río Suchiate</u></p> <p>FUENTE: <u>Río</u></p> <p>DEPARTAMENTO: <u>San Marcos</u></p> <p>MUNICIPIO: <u>Ocos</u></p>	<p>PROYECTO: <u>TÉSIS "DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN"</u></p> <p>DEPENDENCIA: <u>Facultad de Ingeniería/Escuela de Ingeniería Química/USAC</u></p> <p>FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LAB: <u>2014-06-02; 16 h 00 min.</u></p> <p>CONDICIONES DE TRANSPORTE: <u>Con Refrigeración</u></p>
---	--

DETERMINACIONES AISLADAS

INFORME No.	FECHA Y HORA DE RECOLECCIÓN	CLORUROS (mg/L)	SULFATOS (mg/L)	CALCIO (mg/L)	MAGNESIO (mg/L)	ALCALINIDAD (mg/L)
25673	2014-06-01; 09h00min.	211,50	31,00	09,62	17,06	36,00
25674	2014-06-01; 09h42min.	14,50	11,00	06,41	05,36	26,00
25675	2014-06-01; 10h13min.	10,50	09,00	06,41	04,87	30,00
25676	2014-06-01; 10h54min.	13,00	08,00	05,61	04,87	28,00
25677	2014-06-01; 11h11min.	11,00	08,00	06,41	03,90	28,00
25678	2014-06-01; 11h23min.	11,50	07,00	06,41	04,38	30,00
25679	2014-06-01; 11h38min.	10,50	08,00	06,41	04,38	34,00
25680	2014-06-01; 11h50min.	11,50	08,00	06,41	05,36	32,00

Guatemala, 23 de junio 2014



Vo.Bo.
Inga. Telma Maricela Canó Morales
DIRECTORA CII/USAC



[Firma]
Zoraida Much Santos
Ing. Químico Col. No. 420
Escuela de Ingeniería Sanitaria
Laboratorio Técnico

FACULTAD DE INGENIERIA –USAC–
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: http://cii.usac.edu.gt

Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”
CII FIUSAC.

Anexo 8. Resultados UVIGER FAUSAC, Primera fase/época húmeda

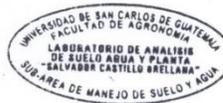


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
LABORATORIO DE SUELO-PLANTA-AGUA "SALVADOR CASTILLO ORELLANA"



INTERESADO: MARIO RAUL PACAY
PROCEDENCIA: RIO SUCHIATE, OCOS, SAN MARCOS
FECHA DE INGRESO: 2/6/2014

IDENTIFICACION	Meq/litro	
	Na	K
ESTACION 1	5.43	1.22
ESTACION 2	0.30	0.05
ESTACION 3	0.22	0.06
ESTACION 4	0.22	0.05
ESTACION 5	0.24	0.07
ESTACION 6	0.24	0.07
ESTACION 7	0.24	0.07
ESTACION 8	0.24	0.06



CAMPUS CENTRAL, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
EDIFICIO UVIGER, TERCER NIVEL, CIUDAD UNIVERSITARIA, ZONA 12, GUATEMALA
CODIGO POSTAL 01012, APARTADO POSTAL 1545; TEL: (502)24189308, (502) 24188000 EXT 1562 ó 1769

Fuente: Unidad de Vinculación y Gestión de Recursos, FAUSAC.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



ORDEN DE TRABAJO 33369
No. 2105

<p>INTERESADO: <u>Mario Raúl Pacay García,</u> Carné No. 2008 15572</p> <p>RECOLECTADA POR: <u>Interesado</u></p> <p>LUGAR DE RECOLECCIÓN: <u>Río Suchiate</u></p> <p>FUENTE: <u>Río</u></p> <p>DEPARTAMENTO: <u>San Marcos</u></p> <p>MUNICIPIO: <u>Ocos</u></p>	<p>PROYECTO: <u>TÉSIS "DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN</u></p> <p>DEPENDENCIA: <u>Facultad de Ingeniería/Escuela de Ingeniería Química/USAC</u></p> <p>FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LAB: <u>2014-07-14; 09 h 58 min.</u></p> <p>CONDICIONES DE TRANSPORTE: <u>Con Refrigeración</u></p>
---	---

DETERMINACIONES AISLADAS

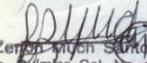
INFORME No.	FECHA Y HORA DE RECOLECCIÓN	CLORUROS (mg/L)	SULFATOS (mg/L)	CALCIO (mg/L)	MAGNESIO (mg/L)	ALCALINIDAD (mg/L)
25733	2014-07-13; 08h10min.	150,00	25,00	16,03	12,18	52,00
25734	2014-07-13; 08h39min.	41,50	14,00	12,83	10,23	56,00
25735	2014-07-13; 08h55min.	10,50	08,00	12,83	05,84	44,00
25736	2014-07-13; 09h09min.	12,50	08,00	11,22	05,84	46,00
25737	2014-07-13; 09h23min.	13,00	08,00	12,02	05,84	44,00
25738	2014-07-13; 09h38min.	13,00	09,00	12,83	03,88	44,00
25739	2014-07-13; 09h53min.	11,50	09,00	12,02	04,38	44,00
25740	2014-07-13; 10h06min.	12,00	10,00	11,22	08,28	44,00

Guatemala, 28 de julio 2014

Vo.Bo. 

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC




Zenon Michel Samps
Ing. Químico Col. No. 420
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
LABORATORIO UNIFICADO DE QUÍMICA Y MICROBIOLOGÍA SANITARIA
"DRA. ALBA TABARINI MOLINA"
USAC
GUATEMALA**

FACULTAD DE INGENIERÍA – USAC –
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina"
CII FIUSAC.

Anexo 10. Resultados UVIGER FAUSAC, Segunda fase/época húmeda

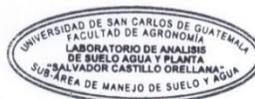


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
LABORATORIO DE SUELO-PLANTA-AGUA "SALVADOR CASTILLO ORELLANA"



INTERESADO: MARIO RAUL PACAY
PROCEDENCIA: RIO SUCHIATE, OCOS, SAN MARCOS
FECHA DE INGRESO: 14/7/2014

IDENTIFICACION	Meq/litro	
	Na	K
ESTACION 1	0.24	7.83
ESTACION 2	0.10	1.39
ESTACION 3	0.07	0.39
ESTACION 4	0.06	0.52
ESTACION 5	0.06	0.48
ESTACION 6	0.06	0.39
ESTACION 7	0.06	0.50
ESTACION 8	0.06	0.39



CAMPUS CENTRAL, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
EDIFICIO UVIGER, TERCER NIVEL, CIUDAD UNIVERSITARIA, ZONA 12, GUATEMALA
CODIGO POSTAL 01012, APARTADO POSTAL 1545, TEL: (502)24189308, (502) 24188000 EXT 1562 Ó 1769

Fuente: Unidad de Vinculación y Gestión de Recursos, FAUSAC.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



ORDEN DE TRABAJO 33 435

No. 2130

<p>INTERESADO: <u>Mario Raúl Pacay García,</u> Carné No. 2008 15572</p> <p>RECOLECTADA POR: <u>Interesado</u></p> <p>LUGAR DE RECOLECCIÓN: <u>Río Suchiate</u></p> <p>FUENTE: <u>Río</u></p> <p>DEPARTAMENTO: <u>San Marcos</u></p> <p>MUNICIPIO: <u>Ocos</u></p>	<p>PROYECTO: <u>TÉSIS "DETERMINACIÓN ESPACIAL DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA EN UN ACUÍFERO COSTERO CON FINES DE EXPLOTACIÓN"</u></p> <p>DEPENDENCIA: <u>Facultad de Ingeniería/Escuela de Ingeniería Química/USAC</u></p> <p>FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LAB: <u>2014-07-28; 16 h 34 min.</u></p> <p>CONDICIONES DE TRANSPORTE: <u>Con Refrigeración</u></p>
---	--

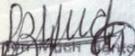
DETERMINACIONES AISLADAS

INFORME No.	FECHA Y HORA DE RECOLECCIÓN	CLORUROS (mg/L)	SULFATOS (mg/L)	CALCIO (mg/L)	MAGNESIO (mg/L)	ALCALINIDAD (mg/L)
25768	2014-07-27; 09h17min.	280,00	35,00	16,03	17,05	46,00
25769	2014-07-27; 09h43min.	28,00	13,00	12,83	06,32	44,00
25770	2014-07-27; 10h03min.	50,00	09,00	11,22	06,33	40,00
25771	2014-07-27; 10h15min.	11,50	09,00	11,22	04,38	46,00
25772	2014-07-27; 10h36min.	11,50	08,00	11,22	05,84	42,00
25773	2014-07-27; 10h59min.	13,00	09,00	12,02	06,82	40,00
25774	2014-07-27; 11h08min.	11,50	09,00	12,02	06,33	42,00
25775	2014-07-27; 11h21min.	13,00	09,00	10,42	04,38	40,00

Guatemala, 11 de agosto 2014

Vo.Bo.
Inga. Telma Marcela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC




Ing. Guillermino Cárdenas
MSc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina" CII FIUSAC.

Anexo 12. Resultados UVIGER FAUSAC, Tercera fase/época húmeda



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
LABORATORIO DE SUELO-PLANTA-AGUA "SALVADOR CASTILLO ORELLANA"



INTERESADO: MARIO RAUL PACAY
PROCEDENCIA: RIO SUCHIATE, OCOS, SAN MARCOS
FECHA DE INGRESO: 28/7/2014

IDENTIFICACION	Meq/litro	
	Na	K
ESTACION 1	5.00	0.19
ESTACION 2	0.78	0.08
ESTACION 3	0.30	0.07
ESTACION 4	0.30	0.07
ESTACION 5	0.30	0.07
ESTACION 6	0.28	0.07
ESTACION 7	0.30	0.07
ESTACION 8	0.30	0.07



CAMPUS CENTRAL, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 EDIFICIO UVIGER, TERCER NIVEL, CIUDAD UNIVERSITARIA, ZONA 12, GUATEMALA
 CODIGO POSTAL 01012, APARTADO POSTAL 1545, TEL: (502)24189308, (502) 24188000 EXT 1562 Ó 1769

Fuente: Unidad de Vinculación y Gestión de Recursos, FAUSAC.