

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO



**DESCRIPCIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LA
MICROCUENCA DEL RÍO LOS LIMONES, MUNICIPIO DE
SUCHITOTO**

PRESENTADO POR:

RAÚL ALEJANDRO ZURA ZAMORA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS
HIDROGEOLÓGICOS**

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSc. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

MSc. MANUEL ROBERTO MONTEJO SANTOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLOGÍCOS

Título :

**DESCRIPCIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LA
MICROCUCNCA DEL RÍO LOS LIMONES, MUNICIPIO DE
SUCHITOTO**

Presentado por:

RAÚL ALEJANDRO ZURA ZAMORA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

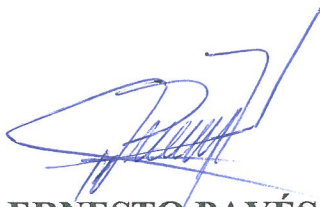
Docente Asesor(a):

MSc. JULIO ERNESTO PAYÉS HERNÁNDEZ

SAN SALVADOR, AGOSTO DE 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'J. Payés Hernández', written over a horizontal line.

MSc. JULIO ERNESTO PAYÉS HERNÁNDEZ

Resumen

Durante el mes de junio de 2021 y febrero de 2022 se llevaron a cabo dos campañas de muestreo con el fin de clarificar la hidrogeoquímica de las aguas presentes en la microcuenca del río Los Limones, ubicada en Suchitoto, municipio de Cuscatlán. Además, se registraron los valores de varios parámetros de campo como son el pH, el oxígeno disuelto (%), potencial redox, conductividad eléctrica, coordenadas geográficas.

Las muestras de agua se tomaron de forma directa del cuerpo de agua (río, manantial o acuífero) haciendo uso de botellas proporcionadas por el laboratorio de análisis químico. En el caso de los parámetros de campo se hizo uso de una sonda multiparámetro AP-5000, marca Aquaread. El análisis e interpretación se realizó utilizando diagramas de Piper, Stiff y diagramas de isolíneas.

En la presente investigación se compararon dos épocas: lluviosa del 2021 y seca del año 2021-2022 y observar si aparecían tendencias en los datos recabados.

Agradecimientos

A Dios, le doy gracias por haberme permitido completar este viaje de conocimiento que implicó la realización de esta maestría.

A mis padres, José Raúl Zura y Ana Cecilia Zamora y hermanos, Cecilia Guadalupe Zura y José Gabriel Zura por haber sido un apoyo constante durante la elaboración de este trabajo de graduación.

A mis profesores de la maestría por haber sido como faros de luz guiándome a través de todos los impedimentos que surgieron a lo largo del camino.

A mi asesor, MSc. Julio Payés, por haberme aconsejado en los distintos elementos de este trabajo de graduación.

A la facultad de Ingeniería y Arquitectura por haberme permitido tomar la Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos.

A la Cooperativa Italiana por haberme brindado apoyo en los análisis de las muestras recolectadas y el asesoramiento brindado en la elaboración de este trabajo de graduación.

Tabla de contenido

Resumen.....	i
Agradecimientos	ii
Tabla de contenido.....	iii
Listado de Tablas.....	vi
Listado de Figuras.....	vii
Listado de Mapas	ix
Nomenclatura	x
Capítulo 1 Alcance y planteamiento del problema	1
1.1 Introducción	1
1.2 Contexto.....	2
1.3 Planteamiento del problema.....	3
1.4 Preguntas generadoras	4
1.5 Objetivos.....	5
1.5.1 General	5
1.5.2 Específicos.....	5
1.6 Justificación	5
1.7 Beneficios esperados	6
1.8 Delimitación de la investigación	6
1.9 Limitaciones de la investigación	6
1.10 Antecedentes	7
1.10.1 Estudios previos.....	7
1.10.2 Clima.....	8
1.10.3 Usos de suelo.....	12
1.10.4 Hidrogeología.....	14
1.10.5 Ríos	16
1.10.6 Pendientes.....	17
1.10.7 Geología.....	18
1.11 Resumen del capítulo.....	23
Capítulo 2 Marco teórico.....	24
2.1 Variables hidrogeoquímicas.....	24
2.1.1 Sólidos disueltos totales	24

2.1.2	Conductividad eléctrica específica.....	27
2.1.3	pH	27
2.1.4	Calcio	28
2.1.5	Magnesio	30
2.1.6	Sodio	31
2.1.7	Potasio.....	32
2.1.8	Azufre.....	32
2.1.9	Alcalinidad (expresada como bicarbonato, HCO_3 y carbonato, CO_3^{2-}).....	33
2.1.10	Cloruro	34
2.1.11	Nitrógeno.....	35
2.1.12	Fósforo	37
2.1.13	Hierro	38
2.2	Balance de aniones y cationes en un análisis químico.....	39
2.3	Presentación de los análisis químicos	40
2.4	Cálculos y comprobaciones que pueden realizarse en un análisis químico	40
2.5	Métodos gráficos	41
2.5.1	Diagrama de Stiff.....	41
2.5.2	Diagrama de Piper	42
2.5.3	Mapa de isolíneas.....	43
2.6	Clasificaciones geoquímicas	47
2.7	Resumen del capítulo.....	48
Capítulo 3	Marco Metodológico.....	49
3.1	Trabajo de gabinete	49
3.2	Trabajo de campo	51
3.3	Análisis e interpretación de resultados	57
3.3.1	Diagrama de Piper	57
3.3.2	Diagrama de Stiff.....	60
3.3.3	Mapa de isolíneas.....	62
3.3.4	Diagramas de Boxplot (de caja y bigotes).....	67
3.3.5	Diagramas de probabilidad normal	68
3.4	Resumen del capítulo.....	68
Capítulo 4	Discusión de resultados.....	70
4.1	Primer muestreo (estación lluviosa) y segundo muestreo (estación seca)	70

4.1.1	Temperatura.....	70
4.1.2	DO (%).....	78
4.1.3	Conductividad eléctrica.....	80
4.1.4	Sólidos disueltos totales (TDS)	83
4.1.5	pH	85
4.1.6	Potencial redox (ORP)	87
4.1.7	Concentración de Calcio	89
4.1.8	Concentración de Magnesio	91
4.1.9	Concentración de Potasio	93
4.1.10	Concentración de Sodio	95
4.1.11	Concentración de Cloruro	98
4.1.12	Concentración de Bicarbonato/Carbonato.....	100
4.1.13	Concentración de Sulfato	102
4.1.14	Concentración de Fosfato.....	104
4.1.15	Concentración de Nitrato.....	106
4.2	Balance iónico.....	108
4.3	Clasificación de las aguas de la microcuenca del río Los Limones.....	111
4.4	Interpretación de resultados de los mapas de isolíneas.....	119
4.5	Resumen del capítulo.....	121
Capítulo 5	Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro	139
Capítulo 6	Referencias bibliográficas	143
Capítulo 7	Anexos	147

Listado de Tablas

Tabla 1.1. Uso de suelo en microcuenca del río Los Limones	12
Tabla 1.2. Unidades hidrogeológicas presentes en la microcuenca del río Los Limones	14
Tabla 1.3. Áreas de pendientes en la microcuenca del río Los Limones	17
Tabla 1.4. Tipos geológicos presentes en la microcuenca del río Los Limones.....	18
Tabla 2.1. Clasificación simple de agua subterránea basado en los TDS	25
Tabla 2.2. Clasificación de Constituyentes Inorgánicos en Agua Subterránea	26
Tabla 2.3. Error admisible del balance iónico según la conductividad medida.....	39
Tabla 2.4. Grupos hidrogeoquímicos que se forman según sea concentración de los distintos iones en la muestra de agua.....	48
Tabla 3.1. Puntos adicionales para la toma de parámetros de campo	55
Tabla 3.2 Método de laboratorio empleado para análisis de iones mayoritarios.....	56
Tabla 4.1. Parámetros de campo, época lluviosa (Junio, 2021).....	73
Tabla 4.2. Concentración de compuestos mayoritarios (mg/l), época lluviosa (Junio, 2021).....	74
Tabla 4.3. Parámetros de campo, época seca (Febrero, 2022).....	75
Tabla 4.4. Concentración de compuestos mayoritarios (mg/l), época seca (Febrero, 2022).....	76
Tabla 4.5. Datos de concentraciones para el sitio de muestreo Pchal-01	108
Tabla 4.6. Cálculo de miliequivalentes por litro para porcentajes de error de balance eléctrico en Pchal-01	108
Tabla 4.5. Clasificación de muestras, época lluviosa.....	112
Tabla 4.6. Clasificación de muestras, época seca	113
Tabla 7.1. Concentraciones de aniones mayoritarios, muestreo época lluviosa.....	147
Tabla 7.2. Concentraciones de cationes mayoritarios, muestreo época lluviosa	147
Tabla 7.3. Porcentajes de aniones mayoritarios, muestreo época lluviosa.....	148
Tabla 7.4. Porcentajes de cationes mayoritarios, muestreo época lluviosa.....	148
Tabla 7.5. Conductividades eléctricas en puntos de muestreo, época lluviosa.....	148
Tabla 7.6. Concentraciones de aniones mayoritarios, muestreo época seca.....	149
Tabla 7.7. Concentraciones de cationes mayoritarios, muestreo época seca.....	149
Tabla 7.8. Porcentajes de aniones mayoritarios, muestreo época seca	149
Tabla 7.9. Porcentajes de cationes mayoritarios, muestreo época seca.....	150
Tabla 7.10. Conductividades eléctricas en puntos de muestreo, época seca	150

Listado de Figuras

Figura 1.1. Temperatura media de meses entre 1970-2000 en estación climática C-8 Ing. San Francisco Aguilares.	9
Figura 1.2. Precipitaciones mensuales medias para el periodo 1970-2000 en estación climática C-8 Ing. San Francisco Aguilares.....	10
Figura 2.1. Modelo de hoja de presentación de resultados de análisis químicos.....	40
Figura 2.2. Diagrama de Stiff de seis análisis químicos	42
Figura 2.3. Diagrama de Piper.....	43
Figura 2.4. Facies hidroquímicas en que se subdivide el diagrama de Piper	44
Figura 2.5 Tipos de pendiente utilizadas en mapas de isolíneas.....	46
Figura 2.6. Utilización de distintos intervalos de clase para representar una misma topografía submarina.	47
Figura 3.1 Sonda multiparamétrica AP-5000.....	52
Figura 3.2 Etiquetado de muestras.....	53
Figura 3.3 Lectura de parámetros de campo.....	54
Figura 3.4. Muestreo de manantial El Borbollón.....	54
Figura 3.5 Preservación de muestras.....	55
Figura 3.6. Interfaz gráfica de Diagrammes	57
Figura 3.7 Botón de creación de plantilla Excel.....	58
Figura 3.8. Plantilla de Excel.....	58
Figura 3.9. Datos cargados de la plantilla de Excel	59
Figura 3.10. Diagrama de Piper.....	59
Figura 3.11. Hoja de cálculo a completar para graficado en diagramas de Stiff	60
Figura 3.12. Selección de datos a graficar en diagramas de Stiff	61
Figura 3.13. Selección del tipo de gráfico a plotear.....	61
Figura 3.14. Tabla que sirve para la identificación de iones a graficar en diagrama de Stiff.....	62
Figura 3.15. Diagrama de Stiff obtenido.....	62
Figura 3.16. Pantalla de inicio de SAGA GIS	64
Figura 3.17. Ubicación de la opción de interpolación mediante B-spline multinivel	64
Figura 3.18. Cuadro de opciones de la interpolación B-Spline multinivel.....	65
Figura 3.19. Mapa interpolado generado.....	65
Figura 3.20. Ubicación de la opción para generar las líneas de contorno o isolíneas	66
Figura 3.21. Cuadro de opciones para la generación de isolíneas.	66
Figura 3.22. Mapa de interpolación generado más isolíneas.....	67
Figura 4.1. Diagrama de boxplot de la temperatura (°C)	70
Figura 4.2. Gráfico de probabilidad normal de la temperatura.....	71
Figura 4.3. Gráfico de líneas de temperatura (°C)	72
Figura 4.4 Diagrama de boxplot de DO %	78
Figura 4.5. Gráfico de probabilidad normal de DO %	79
Figura 4.6. Gráfico de líneas de DO (%)......	80
Figura 4.7. Diagrama de boxplot de la conductividad eléctrica (µS/cm).....	81
Figura 4.8. Gráfico de probabilidad normal de la conductividad eléctrica	81
Figura 4.9. Gráfico de líneas de conductividad eléctrica (µS/cm).....	82

Figura 4.10. Gráfico de boxplot de TDS (mg/l)	83
Figura 4.11. Gráfico de probabilidad normal de TDS.....	84
Figura 4.12. Gráfico de línea de TDS (mg/l).....	84
Figura 4.13. Gráfico de boxplot del pH	85
Figura 4.14 Gráfico de probabilidad normal del pH.	86
Figura 4.15. Gráfico de línea de pH.....	86
Figura 4.16. Gráfico de boxplot de ORP (mV).....	87
Figura 4.17. Gráfica de probabilidad normal de ORP.....	88
Figura 4.18. Gráfico de línea de ORP (mV).....	88
Figura 4.19. Gráfica de boxplot de concentración de Ca (mg/l).....	89
Figura 4.20. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de Ca.....	90
Figura 4.21. Gráfico de línea de concentración Ca (mg/l)	90
Figura 4.22. Gráfico de boxplot de concentración de Mg (mg/l)	91
Figura 4.23. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de Mg.....	92
Figura 4.24. Gráfico de línea de concentración de Mg (mg/l).....	92
Figura 4.25. Gráfico de boxplot de concentración de K (mg/l).....	93
Figura 4.26. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de K	94
Figura 4.27. Gráfico de línea de concentración de K (mg/l)	94
Figura 4.28. Gráfico de boxplot de concentración de Na (mg/l)	95
Figura 4.29. Diagrama de probabilidad normal de la concentración de Na	96
Figura 4.30. Gráfico de línea de concentración de Na (mg/l).....	97
Figura 4.31. Gráfico de boxplot de concentración de Cl (mg/l).	98
Figura 4.32. Gráfico de probabilidad de la concentración de Cl	98
Figura 4.33. Gráfico de línea de concentración de Cl (mg/l)	99
Figura 4.34. Gráfica de boxplot de concentración de HCO ₃ /CO ₃ (mg/l).	100
Figura 4.35. Gráfico de probabilidad de la concentración de HCO ₃ /CO ₃	101
Figura 4.36. Gráfico de línea de concentración de HCO ₃ /CO ₃ (mg/l).	101
Figura 4.37. Gráfico de boxplot de la concentración de SO ₄ (mg/l).....	102
Figura 4.38. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de SO ₄	103
Figura 4.39. Gráfico de línea de la concentración de SO ₄ (mg/l)	103
Figura 4.40. Gráfico de boxplot de la concentración de PO ₄ (mg/l).....	104
Figura 4.41. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de PO ₄	105
Figura 4.42. Gráfico de línea de la concentración de PO ₄ (mg/l)	105
Figura 4.43. Gráfico de boxplot de la concentración de NO ₃ (mg/l)	106
Figura 4.44. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de NO ₃	107
Figura 4.45. Gráfico de línea de concentración de NO ₃ (mg/l)	107
Figura 4.46. Diagrama de Piper, época lluviosa.....	110
Figura 4.47. Diagrama de Piper, época seca.....	112
Figura 4.48. Diagramas de Stiff de puntos de muestreo, época lluviosa.....	114
Figura 4.49. Diagramas de Stiff de puntos de muestreo, época seca	115

Listado de Mapas

Mapa 1.1. Zonas climáticas en la microcuenca del río Los Limones	11
Mapa 1.2. Uso de suelo en la microcuenca del río Los Limones.	13
Mapa 1.3. Unidades hidrogeológicas presentes en la microcuenca del río Los Limones	15
Mapa 1.4. Ubicación de los ríos en la microcuenca del río Los Limones.....	16
Mapa 1.5 Mapa de pendientes de la microcuenca del río Los Limones.....	17
Mapa 1.6 Geología de la microcuenca del río Los Limones	20
Mapa 3.1. Ubicación de Juntas de Agua consideradas en este estudio	50
Mapa 4.1. Mapa de ubicación de puntos de muestreo.	77
Mapa 4.2. Diagramas de Stiff, microcuenca del río Los Limones, época lluviosa.....	116
Mapa 4.3. Diagramas de Stiff, microcuenca del río Los Limones, época lluviosa, continuación ...	117
Mapa 4.4. Diagramas de Stiff, microcuenca del río Los Limones, época seca	118
Mapa 4.5. Isolíneas de conductividad, épocas lluviosa y seca	124
Mapa 4.6. Isolíneas de temperatura, épocas lluviosa y seca.....	125
Mapa 4.7. Isolíneas de concentración de oxígeno disuelto (%), épocas lluviosa y seca.	126
Mapa 4.8. Isolíneas de pH, épocas lluviosa y seca	127
Mapa 4.9. Isolíneas de concentración de TDS, época lluviosa y seca	128
Mapa 4.10. Isolíneas de ORP, época lluviosa y seca	129
Mapa 4.11. Isolíneas de concentración de ion Calcio, época lluviosa y seca.....	130
Mapa 4.12. Isolíneas de concentración de ion Magnesio, época lluviosa y seca.....	131
Mapa 4.13. Isolíneas de concentración de ion Sodio, época lluviosa y seca.....	132
Mapa 4.14. Isolíneas de concentración de ion Potasio, época lluviosa y seca	133
Mapa 4.15. Isolíneas de concentración de ion Sulfato, época lluviosa y seca.....	134
Mapa 4.16. Isolíneas de concentración de ion Fosfato, época lluviosa y seca	135
Mapa 4.17. Isolíneas de concentración de ion Nitrato, época lluviosa y seca.....	136
Mapa 4.18. Isolíneas de concentración de ion Bicarbonato/Carbonato, época lluviosa y seca	137
Mapa 4.19. Isolíneas de concentración de ion Cloruro, época lluviosa y seca.....	138

Nomenclatura

ACRASAME-ZP: Asociación Comunal Rural de Agua Salud y Medio Ambiente Zapote Platanares.

ARAS: Asociación Rural de Agua y Saneamiento Apolinario Serrano.

Ca: ion calcio

CO₃: ion carbonato

Cl: ion cloruro

DO: Dissolved oxygen u oxígeno disuelto

E.B.: Electrical balance o balance eléctrico

Fe: ion hierro

HCO₃: ion bicarbonato

ISCOS: Instituto Sindical para la Cooperación al Desarrollo

K: ion potasio

Na: ion sodio

NO₃: ión nitrato

Mg: ion magnesio

ORP: Potencial de óxido reducción.

PO₄: ion fosfato

SO₄: ion sulfato

TDS: Total dissolved solids o sólidos disueltos totales

Capítulo 1 Alcance y planteamiento del problema

En este capítulo se presenta el contexto socio económico, así como un breve resumen de los sistemas de agua presentes en la microcuenca del río Los Limones. Se indica además que se utilizan métodos gráficos para la descripción de la hidrogeoquímica de la microcuenca del río Los Limones. Estos métodos son los diagramas de Stiff, Piper y de isolíneas. La zona de estudio comprende un área de 110.75 km² y tiene tres tipos de zonas climáticas: Sabana tropical caliente, Sabana tropical calurosa y Clima tropical de las alturas. Entre los usos de suelo más importantes se encuentra el cultivo de la caña de azúcar, los bosques siempre verdes y granos básicos. Cerca de un 82.12% del área de estudio tiene pendientes que van de 0 a 15°. En cuanto a los tipos de geología, los más importantes son: Depósitos poligenéticos de depresiones, Andesitas superiores (coladas y andesitas basálticas) y lavas del volcán escudo Guazapa.

1.1 Introducción

La clasificación hidrogeoquímica implica el muestreo de aguas y el uso de métodos gráficos (que se utilizan en la presente investigación) o estadísticos para la detección de tendencias entre los diversos grupos hidrogeoquímicos de una zona de estudio.

El objetivo general de la presente investigación es describir la hidrogeoquímica de la microcuenca del río Los Limones. Ésto considera describir las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio y determinar las concentraciones de los iones mayoritarios Na, Ca, K, Mg, SO₄, Cl, HCO₃ y CO₃ y de los iones minoritarios Fe, PO₄ y NO₃. También se obtuvieron datos para los siguientes parámetros de campo: temperatura, DO%, DO (mg/l), conductividad eléctrica, TDS, pH y ORP.

El trabajo se divide en siete capítulos. El primer capítulo trata del planteamiento del problema; aquí se mencionan las dos juntas de agua consideradas para el trabajo y las características de la población. En el segundo capítulo se aborda el marco teórico, en el que se da especial énfasis en distintas variables hidrogeoquímicas. El tercer capítulo describe los aspectos metodológicos utilizados en cuanto al trabajo de gabinete, trabajo de campo, y análisis e interpretación de resultados. El cuarto capítulo es acerca de la discusión de resultados. En el quinto capítulo se tiene las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro. El sexto capítulo contiene las referencias bibliográficas. Finalmente, en el séptimo capítulo se encuentran los anexos.

Lo que motivó la realización de este trabajo de graduación fue la relativa poca información que había sobre el tema. Es importante generar información de este tipo puesto que primero permite construir

una línea base de concentraciones de iones mayoritarios, con la cual se compararían muestreos posteriores; y segundo porque sería posible mantener una base de datos para monitorear el grado de contaminación por presencia de cloruros y nitratos¹, principalmente, de ríos y pozos presentes en la zona de estudio.

1.2 Contexto

La zona de estudio es la microcuenca del río Los Limones y se encuentra ubicada en el municipio de Suchitoto, departamento de Cuzcatlán. Con 3.267 km de longitud el río Los Limones recibe contribuciones del río Chalchigüe (17.535 km) y Los Amates (9.818 km). Esta microcuenca forma parte de la subcuenca del Acelhuate y a su vez pertenece a la región hidrográfica A del río Lempa (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017, p. 34).

La cuenca alta del río Los Limones está limitada por el parteaguas formado por el volcán Guazapa, ubicado al sur de la cuenca. El área de estudio presenta alturas que van desde los 247 msnm en la cuenca baja hasta los 1302 msnm en la cuenca alta.

Entre las empresas de importancia por su utilización del agua están AquaCorporación de El Salvador, que se dedica a la venta de tilapia y Textufil, la cual utiliza agua obtenida de pozos perforados para el regadío de plantaciones de la especie de caña *Arundo donax*. Esta especie de caña se utiliza en la generación de electricidad por biomasa. Además, personas en la zona han reportado la contaminación de ríos cercanos por el vertido de residuos procedentes de la fumigación de las plantaciones (Enginyeria Sense Fronteres, 2016).

La población del municipio de Suchitoto tiene las siguientes características: un 77.35% de la población sabe leer. El nivel más alto de educación formal aprobado y que abarca al 81.72% de la población es el de primaria o básica, le sigue educación media con 9.39%.

Con respecto al estado civil, hay un 24.85% acompañado, 19.6% casado, 3.68% viudo, 1.90% separado, 0.31 % divorciado y soltero equivale al 49.66% de la población.

Ahora bien, en cuanto a la condición de actividad económica hay un 34.26% empleados, un 3.51% de cesantes, 1.04% de aspirantes y un 61.79% inactivo. Del total de personas empleadas en alguna actividad económica, hay un 43.03% que se dedican al cultivo de frutas, hortalizas y cereales.

¹ Sin dejar de considerar los demás iones mayoritarios para calcular el error porcentual del balance de electroneutralidad, discutido en la sección 2.2

Mientras que hay un 1.11% dedicadas a la cría de animales (Dirección General de Estadísticas y Censos, 2007).

El municipio de Suchitoto está ubicado a 46 km de la ciudad de San Salvador, y tiene una extensión de 256.72 km². La creación del Embalse Cerrón Grande implicó la anegación de cerca de 3000 manzanas de terreno fértil (Global Water Partnership Central America, 2010).

La zona de estudio se extiende a través de los cantones de Colima, Las Delicias, El Corozal, Consolación, Platanar, Palo Grande, El Zapote, Mirandilla, San Lucas, Haciendita y Buena Vista que forman parte del municipio de Suchitoto. Se puede acceder a la microcuenca mediante la carretera Troncal del Norte (CA-04). Según datos de 2007 de la Dirección General de Estadísticas y Censos (2007), el total de habitantes para dichos cantones era de 9830 personas.

La contaminación en el lago artificial, embalse Cerrón Grande, y en las corrientes superficiales es alta (Global Water Partnership Central America, 2010). Sin embargo, la calidad de agua de los sistemas presentes en Suchitoto es aceptable, porque la mayoría de sistemas se abastecen mediante pozos profundos y captaciones de manantiales.

Cuando terminó el conflicto armado (16 de enero de 1992), la alcaldía de Suchitoto en conjunto con la cooperación internacional impulsó la realización de proyectos de agua y saneamiento, aumentando para las familias rurales la cobertura en un 85% en agua y 80% en saneamiento.

Hasta 2008, el municipio de Suchitoto tenía un total de 4955 acometidas de agua distribuidas en 29 sistemas de agua potable: 28 rurales y 1 urbano (Hernández Rodríguez, 2013). Para este trabajo de graduación se eligieron 2 sistemas de agua: Asociación Comunal Rural de Agua Salud y Medio Ambiente Zapote Platanares (ACRASAME) y Asociación Rural de Agua y Saneamiento Apolinario Serrano (ARAS). Estos dos sistemas están en las proximidades de tres de los ríos más importantes en la microcuenca, a saber, Los Amates, Chalchigüe (ríos tributarios) y Los Limones (río principal). En la cercanía de estos sistemas se ha realizado el muestreo y toma de parámetros de campo, con el objetivo de caracterizar hidrogeoquímicamente las aguas de la microcuenca del río Los Limones.

El río Los Limones vez forma parte de la zona prioritaria 8, que según el Ministerio de Medio Ambiente (2017, p. 46), tiene como factor crítico la contaminación de sus aguas superficiales.

1.3 Planteamiento del problema

Antes del presente estudio no se tenía información de la hidrogeoquímica de la microcuenca del río Los Limones y esta investigación tiene como propósito contribuir a llenar dicho vacío. Esto permitirá empezar a hacer un manejo integral de la microcuenca y vendría a beneficiar a las autoridades que

quieran implementar medidas de protección de esta. Al contar con más estudios hidrogeoquímicos en la microcuenca del río Los Limones se tendría como comparar dichos estudios y así establecer una línea base. La presente investigación tratará de la clasificación hidrogeoquímica de las aguas presentes en la microcuenca del río Los Limones, tomando como referencia la presencia de los iones mayoritarios calcio, magnesio, sodio, potasio, sulfatos, cloruros, carbonatos/bicarbonatos y los iones minoritarios hierro y nitratos. Para ello, es importante conocer la geología del área de estudio porque da una idea de la abundancia de los tipos de roca y minerales presentes en la zona. Cerca del 60% de las rocas en el área de estudio es de tipo ígnea (veáse 1.10.7).

Para realizar la distinción entre rocas ígneas y sedimentarias en la microcuenca se puede describir las formaciones geológicas presentes en la zona. Es de gran ayuda indagar los porcentajes de las áreas de cada una de estas formaciones y así determinar la distribución de estas en la microcuenca. Conocer dichos porcentajes permite determinar el grado relativo de importancia de cada formación.

La presencia de iones mayoritarios puede verse influenciada no sólo por procesos geológicos sino también por procesos biológicos, como la reducción de sulfatos por microorganismos (Martínez de Jesús, G., 2008, p. 10).

Este trabajo emplea métodos gráficos como son el diagrama de Piper, el diagrama de Stiff y el diagrama de isolíneas. El diagrama de Piper consiste en dos diagramas trilineales cuyas coordenadas se proyectan a un diagrama de diamante. Mediante el diagrama de Stiff, se puede generar mapas que muestran los caminos de evolución química de los componentes mayoritarios presentes en las aguas. El mapa de isolíneas presenta la distribución espacial de un componente mayoritario en particular, de tal forma que pueda visualizarse rápidamente los lugares con mayor y menor presencia de dicho componente.

Una consideración importante sobre el presente trabajo es que se trata de una investigación exploratoria, que permitirá que estudios posteriores profundicen más en determinados aspectos mencionados en el apartado de recomendaciones.

1.4 Preguntas generadoras

¿Cuáles son las formaciones geológicas de la microcuenca del río Los Limones?

¿Cuáles son los componentes químicos mayoritarios presentes en las aguas de la microcuenca del río Los Limones, y cómo varían conforme a la época seca y lluviosa?

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Describir la hidrogeoquímica de la microcuenca del río Los Limones.

1.5.2 Específicos

- ✓ Describir las formaciones geológicas de la microcuenca del río Los Limones.
- ✓ Determinar la composición química de los compuestos mayoritarios presentes en las aguas de la microcuenca del río Los Limones.

1.6 Justificación

El grado de contaminación de las aguas superficiales en la zona de estudio, ocasiona que el uso de pozos sea la forma de abastecer de agua a la población. El monitoreo constante de la calidad del agua es de particular interés para las comunidades presentes en el área de estudio puesto que es necesario determinar si el agua en cuestión puede ser usada con fines domésticos, agrícolas o para abrevaderos de ganado porcino y/o bovino.

Los resultados obtenidos por Cuadra Zelaya y Romero García (2006), son esclarecedores en cuanto a la contaminación por metales pesados del Embalse Cerrón Grande, cuerpo de agua cercano a la zona de estudio. La única manera de resolver esta situación es mediante la disminución de los vertidos industriales y domésticos hacia este cuerpo receptor.

Antes del presente estudio no había una clasificación hidrogeoquímica de las aguas presentes en la microcuenca del río Los Limones, por lo cual esta investigación las clasifica en: cloruradas, sulfatadas, carbonatadas y/o bicarbonatadas, cálcicas, magnésicas, potásicas y sódicas. Este trabajo considera el recurso de agua superficial y subterráneo en la definición de los grupos hidrogeoquímicos, mediante diagramas de Piper y de Stiff.

Además, este estudio permite conocer la distribución espacial de iones mayoritarios en la microcuenca del río Los Limones, utilizando diagramas de isolíneas.

La importancia del presente trabajo consiste en la generación de conocimiento base para la zona de la microcuenca del río Los Limones, en lo relativo a sus características hidrogeoquímicas. La

información base se refiere principalmente a la generación de mapas con la distribución espacial de iones mayoritarios.

1.7 Beneficios esperados

La información generada en esta investigación servirá de base para la toma de decisiones por parte de las autoridades locales, en cuanto al monitoreo de las aguas superficiales y subterráneas.

El beneficio esperado del mapa de isolíneas es que permitirá identificar puntos de mayor y menor concentración de iones mayoritarios, con lo cual se podrán localizar lugares con mayor concentración de cloruro y nitratos.

Mientras que la clasificación de las aguas mediante el diagrama de Piper y Stiff, permitirá establecer el tipo hidrogeoquímico dominante presente en la zona de estudio.

1.8 Delimitación de la investigación

El estudio se realizó en la microcuenca del río Los Limones, ubicada en (323,711 – 308,294) m Norte (N) y (482436 – 494169) m Oeste (O) en coordenadas geográficas Lambert. La microcuenca comprende cinco ríos: Los Limones (principal), Los Amates, Chalchigüe, Tasajera y Pacaya. El muestreo considerará los tres primeros ríos. El área comprendida es de 110.75 km².

Las campañas de muestreo del presente estudio abarcaron los meses de junio de 2021 (época lluviosa) y febrero de 2022 (época seca). Se planeó el muestreo en dos pozos perforados, 1 manantial y dos puntos en río. El análisis de las muestras considera a los iones mayoritarios calcio, magnesio, potasio, sodio, sulfato, cloruro, nitratos, carbonatos y bicarbonatos, los iones minoritarios hierro y fosfatos. Adicionalmente se midieron los siguientes parámetros de campo: temperatura, oxígeno disuelto en porcentaje (DO%), conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (TDS), pH y potencial redox.

1.9 Limitaciones de la investigación

El número de sitios de muestreo se han elegido con base en su cercanía con las juntas de agua Asociación Comunal Rural de Agua Salud y Medio Ambiente Zapote Platanares (ACRASAME-ZP) y Asociación Rural de Agua y Saneamiento Apolinario Serrano (ARAS), tomando en cuenta también el factor económico. En total son 10 muestras (5 para cationes y 5 para aniones) por campaña de muestreo.

Otra limitante importante es la obtención de transporte adecuado al terreno de la zona de estudio.

1.10 Antecedentes

1.10.1 Estudios previos

“Ground-water Resources of the Republic of El Salvador Central America, (1951)”, estudio de A.N. Sayre y G.C. Taylor, Jr. donde se describe a nivel de país y de departamento aspectos geológicos y de relieve; también se detallan caudales generados en manantiales captados y pozos de diversas ciudades del país.

“Plan Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (2017)”. Plantea un diagnóstico de las regiones hidrográficas, describiendo una serie de dificultades técnicas a la hora de implementar la legislación vigente. Propone una serie de medidas para corregir el estado de deterioro de 8 zonas prioritarias; estas medidas toman en cuenta proyecciones de aumento de la demanda hídrica.

“Caracterización Hidrogeológica de la Microcuenca del Río Los Amates, Municipio de Suchitoto, Departamento de Cuscatlán, El Salvador (2019)”, donde se realiza un levantamiento de datos geoelectrónicos de la microcuenca del río Los Amates, y se calcula el volumen de recarga del acuífero. Proporciona la ubicación de un conjunto de pozos en la zona de interés.

“A hydrogeological study of the northern parts of the La Libertad, San Salvador, and Cuscatlán Districts in El Salvador: a regional and integrated study (2006)”, en donde se elabora un mapa hidrogeológico de la zona de estudio.

“Evaluación hidrogeoquímica e hidroquímica de la subcuenca del río Aranchacal (2015)”, donde el autor dividió el trabajo de la siguiente forma: una evaluación geológica, hidrológica e hidrogeoquímica; en una evaluación de la especiación química de las aguas, cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal superficial del río Aranchacal, evaluación de la calidad del agua y análisis y evolución temporal de los datos hidrogeoquímicos.

“Evaluación del riesgo de contaminación por plomo en agua subterránea en el Cantón Sitio del Niño, municipio de San Juan Opico (2014)”. En dicha investigación el autor elaboró un conjunto de mapas de la zona alrededor del cantón Sitio del Niño, comprendiendo mapa de vulnerabilidad por el método GOD y mapa de y mapa de fuentes potenciales de contaminación por el método POSH. Además, se evaluó la concentración de plomo en el suelo por medio de análisis por fluorescencia de rayos X (XRF), con el objetivo de determinar el grado de movilización del plomo en el suelo. Se considera que contar con un mapa de vulnerabilidad en la microcuenca del río Los Limones, junto con un mapa de fuentes potenciales de contaminación sería de gran ayuda para la implementación de medidas de

protección de la microcuenca, puesto que permitiría establecer rápidamente que zonas de la microcuenca tienen un mayor riesgo de ser contaminadas.

“Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de áreas de recarga en el acuífero de San Salvador (2010)”, se clasificó las aguas de la zona media y baja de la cuenca como bicarbonatadas-sódicas-cálcicas. Mientras que, en la zona alta, hay presencia de aguas bicarbonatadas-cálcica-magnésicas. Además, el análisis isotópico reveló que las principales áreas de recarga se encuentran sobre los 786 msnm.

“Análisis de la sostenibilidad de los operadores de sistemas de agua potable y saneamiento en el municipio de Suchitoto, departamento de Cuscatlán (2013)”. El autor realizó la evaluación de 14 sistemas de agua utilizando un conjunto de indicadores de gestión; y encontró que la mayoría de los sistemas de agua caen dentro de la categoría A, es decir el sistema se encuentra en buenas condiciones y cubre las necesidades de la población actual y futura.

“Aplicación de biomonitores para evaluar la contaminación por metales pesados en el lago Suchitlán (2006)”. Se determinó que la concentración de mercurio y plomo en dos biomonitores (jacinto de agua y guapote tigre) exceden las concentraciones dadas por el Reglamento de la Comisión de las Comunidades Europeas y la Directiva del Consejo de la Unión Europea. También se evaluaron las concentraciones de cromo, cobre y zinc. El sector del lago a muestrear se eligió con base en la población y concentración urbana, importancia agrícola, importancia turística, proximidad a la presa turística y accesibilidad. El tipo de biomonitor a ocupar se seleccionó con base a una fácil identificación, abundancia y poca movilidad, representativo de la región de estudio, disponibilidad permanente, fácil muestreo y manipulación, y si presenta una bioacumulación buena.

1.10.2 Clima

En la zona de estudio se pueden distinguir tres regiones climáticas de acuerdo con la clasificación de Koppen (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2005):

- Sabana tropical caliente: el rango de altura es de 0-800 msnm. La temperatura media oscila entre los 22-27 °C y 22-28°C en función de la elevación, en las planicies interiores. Prácticamente toda la microcuenca se halla ubicada en esta región climática, excepto el volcán Guazapa y sus alrededores.

- Sabana tropical calurosas: la altura varía de 800 a 1200 msnm. La temperatura media oscila entre los 17-21°C. La parte media y baja del volcán de Guazapa clasifica en esta región climática.
- Clima tropical de las alturas: el rango de altura está en 1200 - 1800 msnm. La temperatura media es inferior a 22°C en el mes más caluroso. La parte más alta del volcán de Guazapa entra en esta categoría (véase Mapa 1.1).

Los siguientes gráficos corresponden a datos de la estación climática C-8 en el Ingenio San Francisco de Aguilares para los años 1970-2000 (Servicio Geológico Checo & Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2004). Del primer gráfico puede observarse que los meses más calurosos son marzo, abril y mayo. Mientras que del segundo gráfico resaltan junio, julio, agosto y septiembre como los meses más lluviosos.

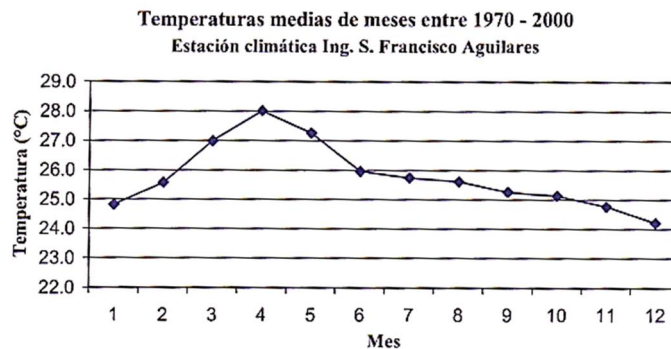


Figura 1.1. Temperatura media de meses entre 1970-2000 en estación climática C-8 Ing. San Francisco Aguilares.
(Adaptado de SNET, 2004)

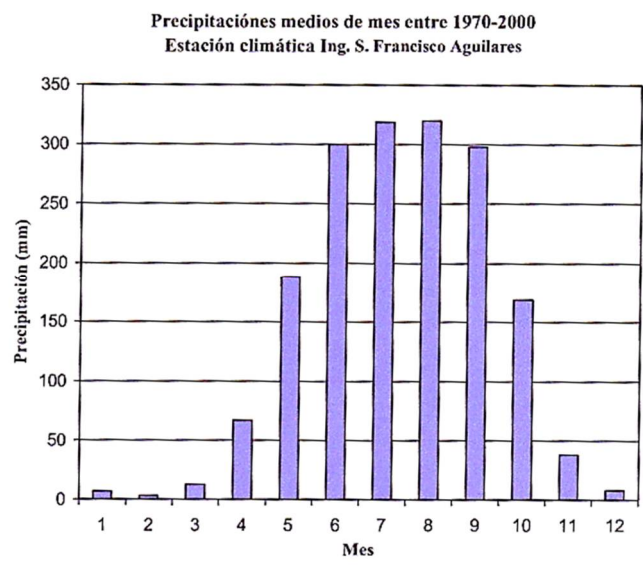
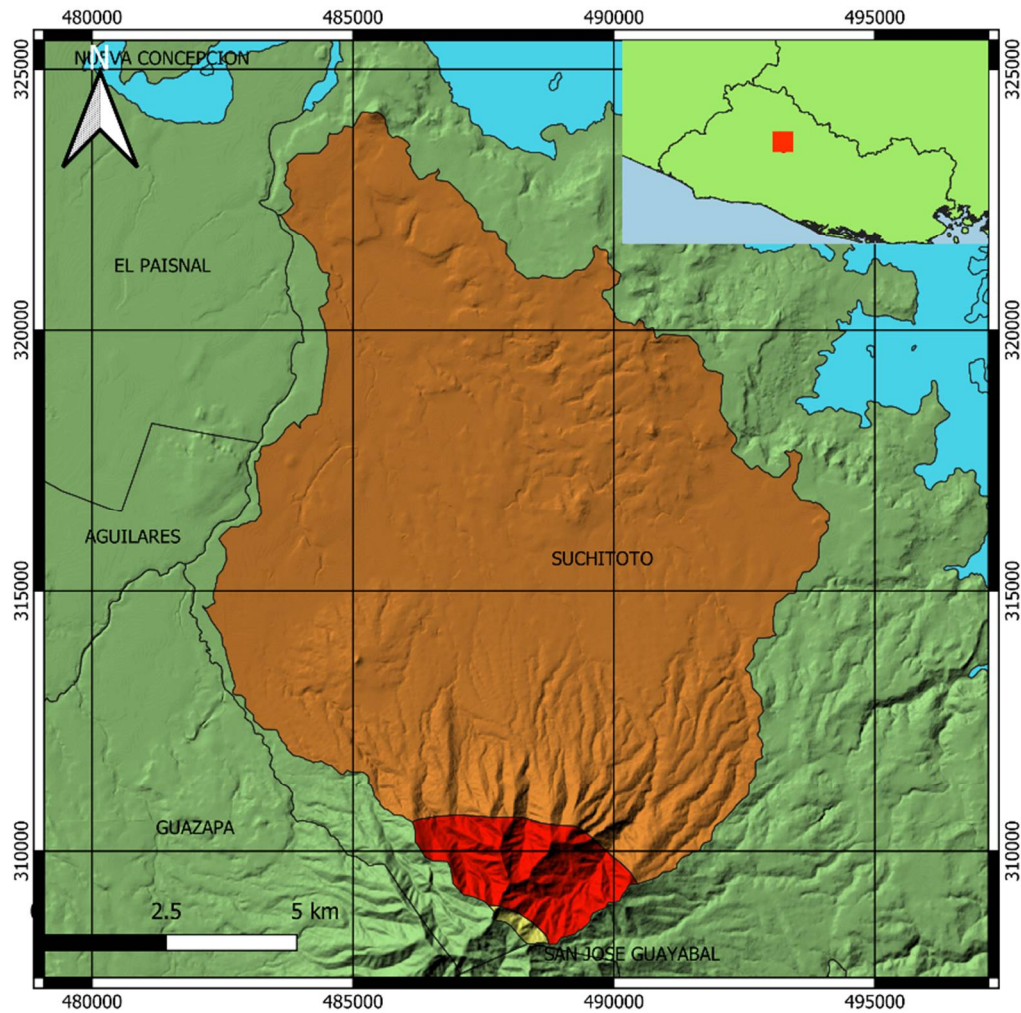


Figura 1.2. Precipitaciones mensuales medias para el periodo 1970-2000 en estación climática C-8 Ing. San Francisco Aguilares.
(Adaptado de SNET, 2004)



Universidad de El Salvador Facultad de
Ingeniería y Arquitectura

TITULO DEL MAPA:
Zona climáticas de la microcuenca del río
Los Limones

LEYENDA

- Cuerpos de agua
- Zonas_climaticas**
- Clima tropical de las alturas
- Sabana tropical caliente
- Sabana tropical calurosa

Autor Raúl Zura Zamora
Sistema de Proyección Cartográfica Cónica
Conformacional de Lambert
Esferoide de Clark 1866
NAD 1927
Escala 1:125000
Fuente de Información: Base cartográfica
del CNR

Fecha de elaboración: 15/01/2022

Mapa 1.1. Zonas climáticas en la microcuenca del río Los Limones

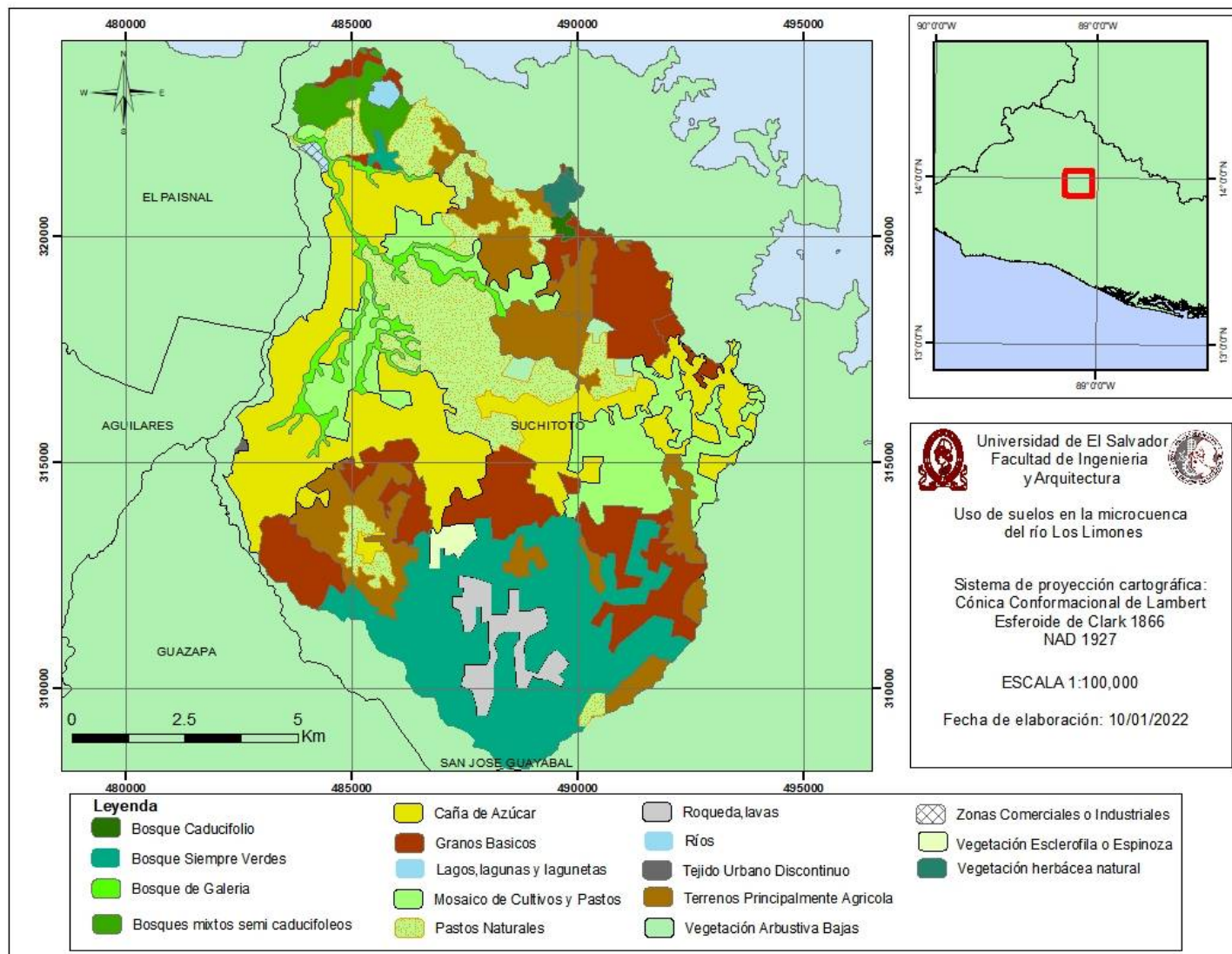
1.10.3 Usos de suelo

La microcuenca del río Los Limones posee un 23.1% de zona boscosa, ubicada principalmente alrededor del estrato volcán Guazapa. El área destinada a zonas comerciales e industriales abarca el 0.18% y se encuentra ubicada en la cuenca baja. El tejido urbano discontinuo representa un 0.05% de la microcuenca. El resto lo forma en su mayoría cultivos (59.09%). El resto lo forman pastos naturales, roquedas o lavas, vegetación y lagos, lagunas y lagunetas con un 17.57%. Se muestra los distintos usos de suelo en el Mapa 1.2.

Tabla 1.1. Uso de suelo en microcuenca del río Los Limones

(Adaptado del archivo shapefile generado en la tesis de Dubón y Rodríguez Ortega (2011))

Categoría	Uso de suelo	Área (km ²)	Porcentaje (%)
1	Bosque Caducifolio	0.249	0.22%
2	Bosque de Galería	3.19	2.88%
3	Bosque Siempre Verdes	19.831	17.90%
4	Bosques mixtos semi caducifolios	2.33	2.10%
5	Caña de Azúcar	23.447	21.17%
6	Granos Básicos	16.665	15.05%
7	Lagos, lagunas y lagunetas	0.323	0.29%
8	Mosaico de Cultivos y Pastos	11.676	10.54%
9	Pastos Naturales	14.465	13.06%
10	Ríos	0.002	0.00%
11	Roqueda, lavas	2.865	2.59%
12	Tejido Urbano Discontinuo	0.056	0.05%
13	Terrenos Principalmente Agrícola	13.657	12.33%
14	Vegetación Arbustiva Bajas	0.598	0.54%
15	Vegetación Esclerófila o Espinoza	0.666	0.60%
16	Vegetación herbácea natural	0.541	0.49%
17	Zonas Comerciales o Industriales	0.196	0.18%
	Total	110.757	100.00%



Mapa 1.2. Uso de suelo en la microcuenca del río Los Limones.

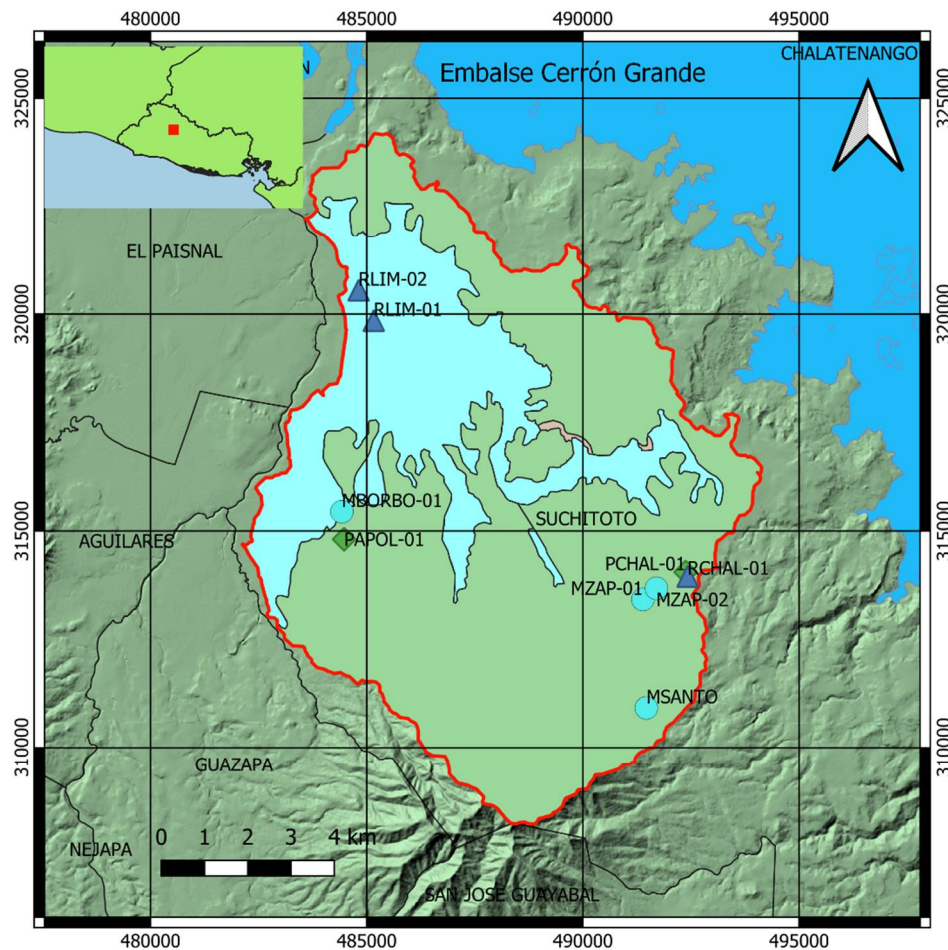
1.10.4 Hidrogeología



En la microcuenca del río Los Limones hay presencia de tres unidades hidrogeológicas. Con respecto a la Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media y la Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Extensión Limitada, su condición de ser un acuífero poroso (la primera) y un acuífero fisurado (la segunda) puede implicar que ambas tienen una alta permeabilidad. La permeabilidad es una propiedad utilizada a la hora de determinar la vulnerabilidad de una zona de estudio. En la presente investigación no fue posible encontrar estudios que detallaran estatus de la zona con respecto al grado de confinamiento, ocurrencia del substrato suprayacente y distancia, factores que permiten determinar la vulnerabilidad de una zona bajo estudio.

Tabla 1.2. Unidades hidrogeológicas presentes en la microcuenca del río Los Limones²

Descripción	Área (km²)	Porcentaje (%)
Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media	31.26	28.23
Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Extensión Limitada y Productividad Media	79.24	71.55
Unidad Rocas No Acuíferas	0.25	0.22
Total	110.75	100.00

² Se obtuvo a partir del mapa Hidrogeológico de El Salvador, ANDA y COSUDE (2008)









 Universidad de El Salvador.
 Facultad de Ingeniería
 y Arquitectura
 




TITULO DEL MAPA:
 Unidades hidrogeológicas, microcuenca del río
 Los Limones

LEYENDA

Tipos de sitio de muestreo

-  Manantial
-  Pozo perforado
-  Río
-  cuerpos_agua
-  Microcuenca del río Los Limones

Unidades hidrogeológicas

-  Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media
-  Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Extensión Limitada y Productividad Media
-  Unidad Rocas No Acuíferas

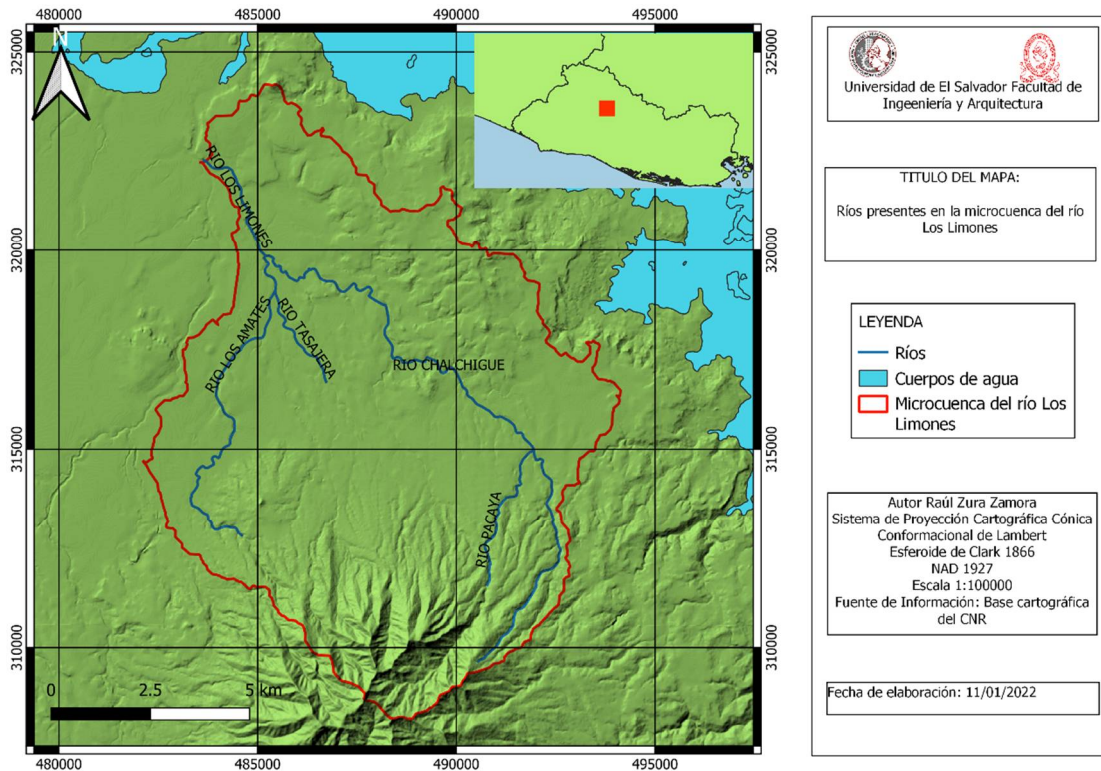
Autor: Raúl Zura Zamora
 Sistema de Proyección Cartográfica Cónica
 Conformacional de Lambert
 Esfereodide de Clark 1866
 NAD 1927
 Escala: 1:120000
 Fuente de información: Mapa hidrogeológico de El Salvador
 Fecha de elaboración: 7/04/2022

Mapa 1.3. Unidades hidrogeológicas presentes en la microcuenca del río Los Limones

(Obtenido del mapa Hidrogeológico de El Salvador, ANDA y COSUDE (2008))

1.10.5 Ríos

Los ríos presentes en la microcuenca del río Los Limones se muestran en el siguiente mapa. Son un total de 5 ríos: Los Limones, Chalchigüe, Los Amates, Tasajera y Pacaya. Si bien en la actualidad únicamente el río Los Limones, Chalchigüe y Los Amates se mantienen corriendo tanto en invierno como en verano. El río Chalchigüe es el de mayor longitud con 17.54 km, le sigue Los Amates con 9.82 km. El río Los Limones tiene únicamente 3.30 km de longitud, pero es el más caudaloso, ya que en Los Limones se unen los flujos provenientes del río Los Amates, Tasajera y Chalchigüe.



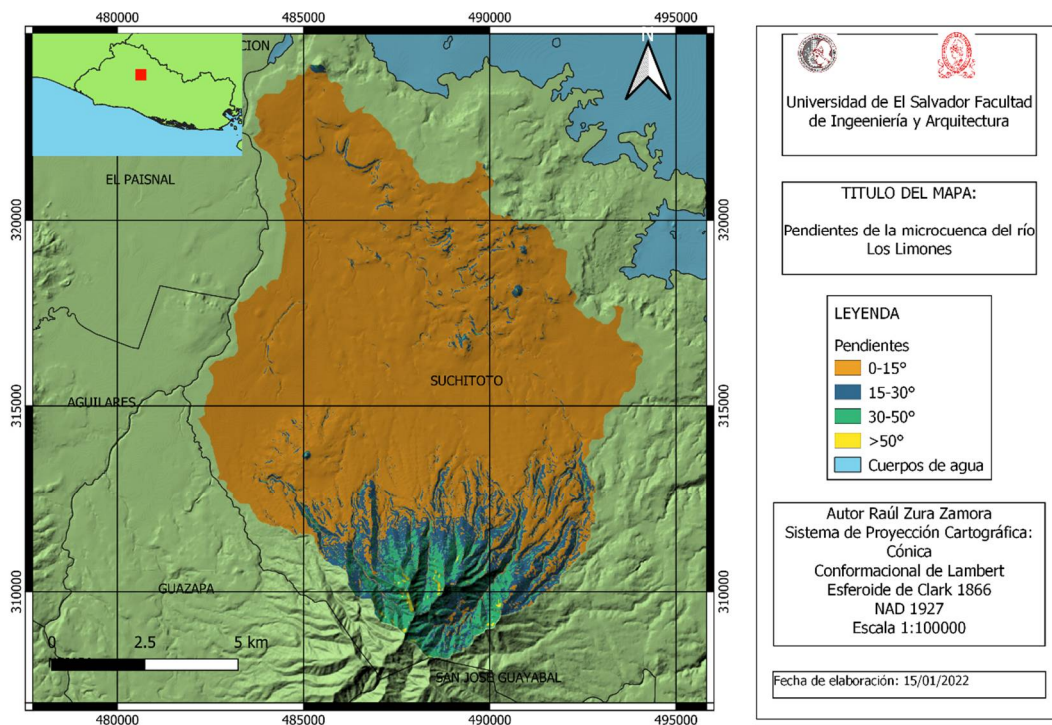
Mapa 1.4. Ubicación de los ríos en la microcuenca del río Los Limones

1.10.6 Pendientes

Las pendientes en la microcuenca varían entre los 0° a 59.916° . Las pendientes más pronunciadas se encuentran en los alrededores del volcán Guazapa, en la cuenca alta hacia el sur, mientras que las pendientes más reducidas se hallan en la cuenca baja y media. Como puede verse en la Tabla 1.3 y Mapa 1.5, la mayor área ocupada por un tipo de pendiente corresponde a la categoría de 0 a 15° .

Tabla 1.3. Áreas de pendientes en la microcuenca del río Los Limones

Pendiente ($^\circ$)	Área (km ²)	Porcentaje (%)
0-15	90.6	81.80%
15-30	12.929	11.67%
30-50	6.728	6.07%
≥ 50	0.5	0.45%
Total	110.757	100.00%



Mapa 1.5 Mapa de pendientes de la microcuenca del río Los Limones.

1.10.7 Geología

La geología de la zona se describe según la información dada en un estudio realizado por el Servicio Geológico Checo. En 2003 el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) del Ministerio de Medio Ambiente y el Ministerio de Medio Ambiente Checo a través del Servicio Geológico Checo firmaron un acuerdo para la realización de un estudio geológico en El Salvador.

Dicho estudio fue llevado a cabo en la parte norte de los Departamentos de La Libertad, Cuscatlán y San Salvador. El objetivo principal fue la ubicación y evaluación de posibles riesgos naturales condicionados por la geología (Servicio Geológico Checo & Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2004). Los tipos de geología documentados se muestran en el Mapa 1.6 y en la Tabla 1.4 estos se resumen.

Tabla 1.4. Tipos geológicos presentes en la microcuenca del río Los Limones.

Geología	Descripción	Área (km²)	Porcentaje (%)
1	Depósitos antropógenos	0.257	0.232
2	Sedimentos fluviales	6.658	6.012
3	Sedimentos de conos de deyección	5.125	4.628
4	Sedimentos de conos de deyección fósiles	7.695	6.948
5	Depósitos poligenéticos de depresiones	14.535	13.124
8	Depósitos de avalanchas de detritos y flujos de detritos	3.566	3.220
12	Secuencias de mares	0.716	0.647
14a	Coladas de lava - de conos de lava	8.820	7.964
16	Basaltos ricos en Ni-Cr	1.677	1.514
17	Andesitas superiores - coladas basálticas y andesitas basálticas	34.926	31.536

Geología	Descripción	Área (km²)	Porcentaje (%)
19	Lavas del volcán escudo Guazapa	18.929	17.092
20	Aglomerados de flujos piroclásticos tipo "bloque y ceniza" -grupo "Rana" facies gruesa	7.846	7.084
Total		110.750	100.000%

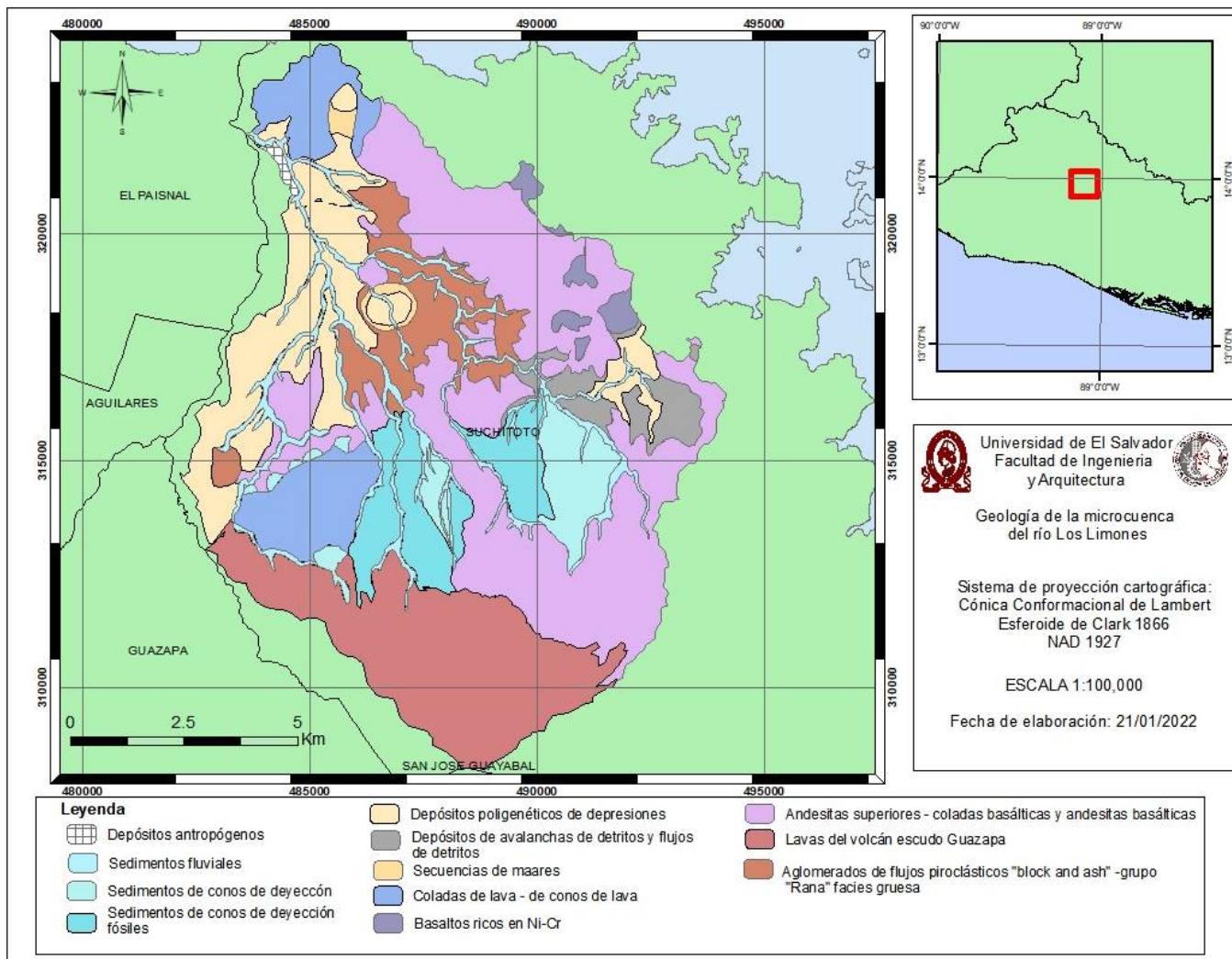
Como puede verse en la tabla anterior, cerca de un 60% del área de estudio está conformada por rocas ígneas (coladas de lava, basaltos ricos en Ni-Cr, andesitas superiores y lavas del volcán escudo Guazapa). A continuación, se explican los distintos tipos de geología encontrados en la tabla previa.

Sedimentos fluviales recientes

Estos sedimentos rellenan los lechos de corrientes actuales, principalmente los de los ríos Lempa, Acelhuate, Sucio, Talcualuya y Suquiapa. En el río Lempa, pueden observarse dos niveles: el nivel superior tiene un horizonte de 1-2 m de lodo aluvial arenoso mientras que el nivel inferior tiene solo gravas fluviales.

En el río Chalchigüe existe un afloramiento de 4 m de altura: en la base yacen las gravas fluviales mientras que arriba pueden encontrarse lodos aluviales con horizonte de suelo sub-fósil. Los depósitos fluviales de áreas denudadas tienen un carácter un poco diferente. Puesto que el gradiente es más alto, los rellenos de los valles se componen desde gravas hasta bloques de rocas que se transportan con las corrientes fuertes (Servicio Geológico Checo & Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2004, pp. 33–35).

Esta geología aflora básicamente en la zona baja y media de la microcuenca.



Mapa 1.6 Geología de la microcuenca del río Los Limones
(tomado de Servicio Geológico Checo (2004))

Conos de deyección

Litológicamente se componen de gravas gruesas o gravas y arenas finas, a medida que se modifica el gradiente del lecho. A diferencia de los conos de deyección recientes, los conos fósiles manifiestan una superficie meteorizada en colores rojizos y son más compactos.

Estos conos se encuentran alrededor de los pueblos El Rosario, El Zapote y Buenavista y en las laderas del Norte del Volcán Guazapa (Servicio Geológico Checo & Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2004, p. 35).

Esta geología se encuentra en la zona media de la microcuenca.

Rellenos poligenéticos de depresiones

Estos sedimentos mezclados cubren la mayor parte de áreas llanas al lado de los ríos Talcualuya, Suquiapa y Sucio, pero el área con mayor extensión se alcanza en la planicie de Aguilares, al lado del río Matizate y Acelhuate hasta sus desembocaduras al río Lempa.

Los sedimentos tienen tonos claros y son compuestos por arenas y gravas fluviales, pómez redepositada, sedimentos epiclásticos, flujos de fragmentos, etc. Meyer Abich (1960) menciona también la presencia de sedimentos lacustrino y diatomitas. Estos depósitos tienen una potencia de hasta 10 m. La presencia de sedimentos gruesos, depósitos de flujos de lodo y lahares es un indicio de la actividad deposicional y erosiva por flujos de detritos de las áreas de gradiente mayor (probablemente provenientes de las laderas del volcán Guazapa).

Alternaciones de gravas y arenas fluviales con capas de pómez redepositada se ha documentado en areneras abandonadas alrededor de Colima, en la desembocadura del Río Lempa al embalse. Dichos sedimentos pueden correlacionarse con los sedimentos lacustrinos-fluviales que menciona Rode (1975) del río Lempa. Toda la secuencia está sobreyacida por arenas de maar y coladas basálticas. Los rellenos poligenéticos de depresiones suelen ser sobreyacidos por cenizas de Tierra Blanca joven, a menudo redepositados en tierra arable. Los suelos desarrollados sobre este material manifiestan buena calidad para cultivo tradicional (maíz y caña de azúcar).

En la vertiente del Norte del volcán Guazapa han sido distinguidos dos generaciones de sedimentos coluviales. La parte inferior se compone de sedimentos compactos, multicolores, arcillosos, con bloques descompuestos y fragmentos de andesitas. La parte superior posee cementación débil y contiene fragmentos y guijarros de lavas poco meteorizados. Los depósitos coluviales son a menudo acompañados por deslizamientos y flujos de detrito. Esto representa un riesgo potencial al área

urbanizada (Servicio Geológico Checo & Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2004, pp. 35–38).

Los rellenos poligenéticos se hallan en su mayoría al oeste de la microcuenca, en la zona baja y media.

Depósitos de flujos de detritos y avalanchas de detrito

Durante la evolución volcánica se presentaron los derrumbes de los edificios volcánicos, produciéndose los flujos y avalanchas de detritos. En los valles se han producido alrededor del volcán Guazapa hasta alcanzar la base de este. Al oeste de San José Guayabal se observan los depósitos del lahar fósil. La matriz de color gris-marrón se preserva en los bloques de andesitas de hasta 20-30 cm de diámetro. El espesor de este lahar es de 3 m (Servicio Geológico Checo & Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2004, p. 28).

Estos depósitos se encuentran al este de la microcuenca, en la zona media.

Andesitas superiores - coladas basálticas y andesitas basálticas

Las andesitas superiores predominan en las cercanías del Norte del Volcán Guazapa. La mayoría de las lavas basálticas se originaron por efusiones repetidas, sin embargo, no se conocen los centros de emisión. Microscópicamente, predominan las rocas de grano medio, la estructura es porfídica, la matriz es vítrica formada por plagioclasa. Los fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, olivino, magnetita o ilmenita son constituyentes de la roca.

Los basaltos predominan y a menudo contienen olivino, pero otras veces se trata de andesitas basálticas. Poseen color gris oscuro cuando están frescos, pero cuando están meteorizados se tornan gris-verde.

En algunos lugares también se observa alteración hidrotermal. Los basaltos frescos evidencian estructuras vesiculares. El rasgo típico observado es la transición gradual de basaltos y andesitas basálticas, conteniendo fenocristales de clinopiroxeno u ortopiroxeno y la escasez general de andesitas en estas secuencias (Servicio Geológico Checo & Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2004, pp. 28–30).

Esta geología aflora en toda la microcuenca del río Los Limones.

Lavas del volcán escudo guazapa

El volcán escudo de Guazapa se formó en varias etapas por actividades efusivas. El volcán Guazapa está situado en el sitio donde se cruzan los sistemas tectónicos importantes de rumbos N-S, NW-SE y NE-SW. Los movimientos tectónicos partieron el edificio volcánico en varios segmentos y las fallas y sistemas de fisuras pudieron reactivarse durante los eventos sísmicos. Las coladas de lava salieron tanto del cráter principal (hoy destruido) como de los centros parásitos. Estas lavas poseen varias estructuras, generalmente masivas en el centro con facies vesiculares en las superficies (Servicio Geológico Checo & Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2004, pp. 28–29).

Este tipo de lavas se encuentran en la parte alta de la microcuenca.

Aglomerados de flujos piroclásticos tipo "bloque y ceniza" -grupo "Rana" facies gruesa

Los depósitos aglomeráticos tipo "Rana" están constituidos por flujos piroclásticos del tipo bloque y ceniza con composición desde andesita basáltica hasta andesita. Estos depósitos son de aglomerados gruesos, bien soldados, cementados y a veces estratificados.

Macroscópicamente se observan fragmentos de andesita bastante vesicular y redondeados en matriz de ceniza. Típicamente estos depósitos se identifican por el color café violáceo y por el estilo de meteorización (los fragmentos de andesita basáltica son resistentes y sobresalen porque la matriz ha sido erosionada, dando un aspecto de superficie con verrugas, que recuerda la piel de la rana).

Los flujos piroclásticos tipo Rana no fueron producidos en una sola erupción, sino que en varias erupciones con interrupciones cortas (Servicio Geológico Checo & Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2004, pp. 12–13, 25).

Este tipo de depósitos se encuentran en la zona baja y media de la microcuenca.

1.11 Resumen del capítulo

El mayor uso de suelo en la microcuenca del río Los Limones corresponde a la caña de azúcar con un 21.2%. Cerca de un 82.12% del área de estudio tiene pendientes que van de 0 a 15°. Los tipos de geología más importantes son: Depósitos poligenéticos de depresiones (13.12%), lavas del volcán escudo Guazapa (17.09%) y Andesitas superiores (coladas y andesitas basálticas) (31.54 %). En el siguiente capítulo se hablará de las variables más usadas para la descripción hidrogeoquímica de una zona de estudio.

En este capítulo se describirán las variables que se ocuparán en este estudio para describir la hidrogeoquímica de la zona de estudio. Estas variables son los sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica específica, pH, concentración de ion calcio, ion magnesio, ion sodio, ion potasio, ion sulfato, alcalinidad, ion cloruro, ion nitrato, ion fosfato e ion hierro. Se presenta el balance de electroneutralidad como una medida del nivel de error experimental que puede tener un análisis químico. Se describen además los métodos gráficos a utilizar en este trabajo para la representación de propiedades hidrogeoquímicas.

2.1 Variables hidrogeoquímicas

Según Guller et al (2002), hay un total de 11 variables que se utilizan con más frecuencia para describir la hidrogeoquímica de una zona y son:

- conductividad específica,
- pH,
- SiO₂,
- Ca²⁺,
- Mg²⁺,
- Na⁺,
- K⁺,
- SO₄²⁻,
- HCO₃ y CO₃²⁻ (alcalinidad)
- Cl⁻ y
- F⁻.

En este trabajo se estudiarán estas variables a excepción de SiO₂ y F⁻ y la inclusión de NO₃⁻, PO₄³⁻, hierro, y sólidos totales disueltos. La razón de no incluir el SiO₂ es porque no se trata de un ion y por lo tanto no se grafica en el diagrama de Stiff y Piper. La inclusión del NO₃⁻ y del PO₄³⁻ es porque se espera que las concentraciones de dichos iones sean relativamente altas, dadas las actividades agrícolas que se realizan en la zona de estudio. Finalmente, el F⁻ no se utilizó porque por lo general no se grafica en los diagramas de Piper y Stiff.

2.1.1 Sólidos disueltos totales

Como resultado de las interacciones químicas y bioquímicas entre el agua subterránea y los materiales geológicos a través de los cuales fluye el agua, y en menor medida, de las contribuciones desde la

atmósfera y el agua superficial, el agua subterránea contiene una amplia variedad de constituyentes inorgánicos disueltos en varias concentraciones. La concentración de los sólidos disueltos totales en agua subterránea se determina pesando el residuo sólido obtenido mediante la evaporación hasta su secado completo de un volumen medido de muestra filtrada. El residuo sólido consiste casi invariablemente de constituyentes inorgánicos y cantidades muy pequeñas de materia orgánica (Freeze & Cherry, 1979, p. 84).

La concentración de los sólidos disueltos totales (SDT) en agua subterránea varía en varios órdenes de magnitud. Un esquema sencillo de clasificación, aunque muy utilizado para categorizar el agua subterránea se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Clasificación simple de agua subterránea basado en los TDS
(adaptado de Freeze y Cherry (1979))

Categoría	Sólidos disueltos totales (mg/l o g/m ³)
Agua fresca	0-1,000
Agua salobre	1,000-10,000
Agua salina	10,000-100,000
Salmuera	Más de 100,000

Una clasificación de las especies inorgánicas que aparecen en agua subterránea se muestra en la Tabla 2.2. En algunas aguas subterráneas, se exceden los rangos de concentración. Los constituyentes mayoritarios aparecen en forma iónica y son comúnmente llamados iones mayoritarios (Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻). La concentración de estos seis iones mayoritarios comprende más del 90% de los sólidos disueltos totales en el agua, sin tomar en cuenta si es agua diluida o tiene una salinidad mayor que el agua de mar. La concentración de los constituyentes mayoritarios, minoritarios y traza en agua subterránea es controlada por la disponibilidad de los elementos en el suelo y roca a través de la cual pasa el agua, por restricciones geoquímicas como la solubilidad y adsorción; por las velocidades de los procesos geoquímicos y por la secuencia en la que el agua ha entrado en contacto con los minerales.

En algunos casos las contribuciones dadas por actividades humanas pueden ocasionar que algunos de los elementos enlistados como minoritarios o traza aparezcan como contaminantes a niveles de concentración que son órdenes de magnitud arriba de los rangos normales indicados en la tabla. Como ejemplo podemos mencionar los vertidos por parte de la industria de la curtiembre con

concentraciones de cromo de alrededor de 1.78 mg/l (Ortiz Portillo & Rodríguez Canacas, 2009), muy por encima de 0.05 mg/l, valor establecido en el reglamento técnico salvadoreño 13.02.01:14.

Tabla 2.2. Clasificación de Constituyentes Inorgánicos en Agua Subterránea
(adaptado de Freeze y Cherry (1979))

Constituyentes mayoritarios (mayor que 5 mg/l)			
Bicarbonato		Silicio	
Calcio		Sodio	
Cloruro		Sulfato	
Magnesio		Ácido carbónico	
Constituyentes minoritarios (0.01 – 10.0 mg/l)			
Boro		Nitrato	
Carbonato		Potasio	
Fluoruro		Estroncio	
Hierro			
Constituyentes traza (menor que 0.1 mg/l)			
Aluminio	Cobalto	Molibdeno	Talio
Antimonio	Cobre	Níquel	Torio
Arsénico	Galio	Niobio	Estaño
Bario	Germanio	Fosfato	Titanio
Berilio	Oro	Platino	Tungsteno
Bismuto	Indio	Radio	Uranio
Bromuro	Yoduro	Rubidio	Vanadio
Cadmio	Lantano	Rutenio	Iterbio
Cerio	Plomo	Escandio	Itrio
Cesio	Litio	Selenio	Zinc
Cromo	Manganeso	Plata	Zirconio
Mercurio			

2.1.2 Conductividad eléctrica específica

La conductancia eléctrica o conductividad es la habilidad de una sustancia de conducir una corriente eléctrica. La conductancia eléctrica específica es la conductancia de un cuerpo con una unidad de longitud y una unidad de sección transversal a una temperatura específica (Hem, 1985, p. 66). La conductividad eléctrica también puede considerarse como el recíproco de la resistencia en ohms medida entre caras opuestas de un cubo de 1 cm^3 de una solución acuosa a una temperatura específica. Por ello, las unidades de la conductancia específica son reportadas como el recíproco de ohms o mhos. Las aguas naturales tienen conductancias mucho menores a 1 mho y para evitar decimales, los datos se reportan en micromhos.

El agua destilada tiene conductancia muy baja, pero la presencia de iones la vuelve conductiva. A medida que la concentración de iones aumenta, la conductancia de la disolución incrementa; por lo tanto, la medida de la conductancia proporciona un indicio de la concentración iónica.

Las aguas naturales no son simples disoluciones. Ellas contienen una variedad tanto de iones como especies sin disolver y las cantidades y proporciones de cada rango pueden variar ampliamente. La relación entre la conductividad específica K y los sólidos disueltos S puede expresarse como:

$$KA = S \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde A es un factor de proporcionalidad que en el caso de aguas naturales puede variar entre 0.54 y 0.96.

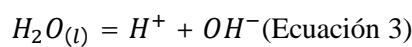
La conductancia de aguas superficiales y subterráneas tienen un rango de variación bastante amplio: en áreas donde la precipitación es baja en solutos y las rocas son resistentes al ataque, la conductancia puede ser de $50 \mu\text{mho/cm}$. En otras áreas, conductancias de hasta $50,000 \mu\text{mho/cm}$ pueden alcanzarse; este valor es la conductancia debida a agua de mar. Una salmuera, asociada con la *halita* (NaCl), puede llegar a alcanzar valores equivalentes a diez veces la concentración de sólidos disueltos del agua de mar.

2.1.3 pH

La concentración efectiva (actividad) del ion hidronio, H^+ se expresa de forma conveniente en unidades logarítmicas de la siguiente forma (Hem, 1985, p. 61):

$$pH = -\log [H^+] \text{ (Ecuación 2)}$$

Incluso cuando no haya solutos presentes, unas pocas moléculas de agua se disociarán en iones H^+ y OH^- . Este proceso de disociación es un equilibrio químico que puede escribirse como:



Utilizando la ley de acción de masas, este equilibrio puede expresarse como:

$$\frac{[H][OH]}{[H_2O]} = K_w \text{ (Ecuación 4)}$$

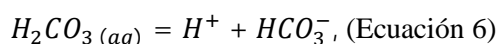
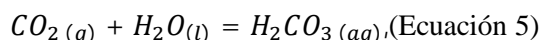
Por convención, la actividad del agua líquida se aproxima a uno en este tipo de disolución diluida. Luego la constante K_w es igual al producto de las actividades de H^+ y OH^- . El producto de actividad de ion para el agua a $25^\circ C$ es en términos exponenciales 10^{-14} . El logaritmo de K_w es de -14.00. En el punto de neutralidad, $[H] = [OH]$ y por lo tanto $pH = 7.00$.

A temperaturas más altas, K_w incrementa y el valor neutral del pH disminuye; el valor dado para $30^\circ C$ es $10^{-13.837}$. El pH neutral para $30^\circ C$ será 6.92. El valor de K_w a $0^\circ C$ es de $10^{-14.695}$, lo que indica que el pH neutral a esa temperatura es de 7.48. El fuerte efecto de la temperatura en el comportamiento de los iones H^+ es muy importante y debe tomarse en cuenta en las medidas de pH y cálculos que utilicen datos de pH .

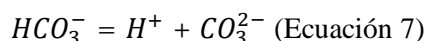
El contenido del ion H^+ del agua natural calculado en moles por litro está usualmente en el nivel de detección de elementos traza. A $pH = 7$, únicamente 1×10^{-7} moles por litro de H^+ se encuentra presente. Los constituyentes mayoritarios de la mayoría de las aguas naturales están en el rango de 10^{-4} moles por litro y aumentando. Por lo que el ion H^+ no se aproxima al estatus de un componente mayoritario hasta que el pH alcanza un valor de 4.

La actividad del ion H^+ en una disolución acuosa es controlada por reacciones químicas interrelacionadas que producen o consumen hidrógeno. El pH del agua natural es un indicador útil del estatus de las reacciones de equilibrio en el que el agua participa.

La reacción de dióxido de carbono disuelto con agua, la cual es una de las reacciones más importantes en lo que se refiere a pH en sistemas de agua natural es representado por tres pasos:



Y



Tanto el segundo como el tercer paso produce H^+ e influye en el pH de la disolución. Las aguas de río que no están influenciadas por contaminación tienen un pH en el rango de 6.5 a 8.5.

2.1.4 Calcio

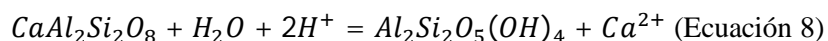
El calcio es el elemento más abundante de los metales alcalinotérreos y es un constituyente principal de muchos minerales. Es un elemento esencial para formas de vida vegetal y animal, además de ser un constituyente mayoritario de los solutos en aguas naturales. Tiene un único estado de oxidación Ca^{+2} (Hem, 1985, p. 89).

Su química va muy asociada a la de los iones HCO_3^- y CO_3^{2-} en muchas aguas naturales, pudiéndose precipitar y disolver con facilidad al cambiar el pH o la presión parcial del CO_2 (Custodio & Llamas, 1983, p. 203). El calcio también participa en equilibrios de intercambio de cationes en la superficie de minerales aluminosilicatados y de otros minerales.

Las concentraciones del calcio varían entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a 600 ppm en aguas selenitosas. El agua de mar contiene 400 ppm. Excepcionalmente se puede tener 50000 ppm en salmueras de CaCl_2 . El mayor inconveniente está asociado al aporte de dureza y producción de incrustaciones (Custodio & Llamas, 1983, p. 203).

El calcio es un constituyente esencial de muchas rocas ígneas, especialmente del piroxeno y del anfíbol y de los feldespatos. El grupo de minerales de *feldespato de plagioclasa* representa mezclas en varias proporciones de los miembros *albita* $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ y *anortita* $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.

Algo de calcio se espera del agua que ha estado en contacto con rocas ígneas y metamórficas. Sin embargo, la concentración es baja porque la tasa de descomposición de la mayoría de los minerales ígneos es lenta (Hem, 1985, p. 89). La descomposición de la *anortita* puede representarse como:



La composición normal del *feldespato de plagioclasa* se encuentra entre las formas con sodio puro o con calcio puro y la descomposición producirá tanto calcio como sodio.

Las formas más comunes de calcio en rocas sedimentarias son los carbonatos. Las dos formas cristalinas, *calcita* y *aragonita*, tienen ambos la fórmula CaCO_3 y el mineral *dolomita* puede ser representado como $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Otros minerales de calcio comunes en los sedimentos incluyen los minerales sulfatados *yeso* ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y *anhidrita* (CaSO_4).

En arenisca y otras rocas detríticas, el carbonato de calcio está presente como cemento entre partículas o como relleno parcial de los intersticios. El calcio también está presente en la forma de iones adsorbidos en superficies cargadas negativamente en suelos y rocas.

El equilibrio que involucra a los carbonatos es el factor principal en la limitación de la solubilidad de calcio en la mayoría de las aguas naturales.

Por lo general el calcio es el catión predominante en las aguas de los ríos (Hem, 1985, p. 93).

2.1.5 Magnesio

El magnesio es un metal alcalino térreo y tiene un único número de oxidación de importancia en la química del agua, que es Mg^{2+} . Este es un elemento común y es esencial en la nutrición vegetal y animal (Hem, 1985, p. 96).

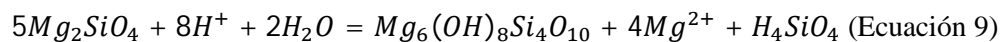
En algunos aspectos con respecto a la química del agua, el calcio y el magnesio son equivalentes, como en su contribución a la propiedad de la dureza. El comportamiento geoquímico del magnesio es sustancialmente diferente que el de calcio. Los iones de magnesio son más pequeños y pueden ser acomodados en el centro de un octaedro formado por seis moléculas de agua. La tendencia de los compuestos cristalinos de magnesio para contener agua o hidróxido está probablemente relacionado a su tendencia de hidratación.

Sus concentraciones varían entre 1 y 100 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a veces a algunos miles de ppm en aguas salinas o salmueras. El agua de mar contiene 1200 ppm. El magnesio tiene propiedades laxantes y le da un sabor amargo al agua si hay algunos centenares de ppm. Contribuye a la dureza del agua y además a pH elevado puede dar $Mg(OH)_2$ incrustante (Custodio & Llamas, 1983, p. 203).

En rocas ígneas, el magnesio es típicamente un constituyente mayor de los minerales ferromagnesianos oscuros. Estos incluyen *olivino*, *piroxeno*, *anfíboles* y las *micas oscuras*. En rocas alteradas se presentan especies minerales de magnesio como *clorita* y *serpentinita*. (Hem, 1985, p. 97).

Las formas sedimentarias de magnesio incluyen carbonatos como *magnesita* e *hidromagnesita*, el hidróxido *brucita* y mezclas de magnesio con carbonato de calcio.

La alteración del *olivino* (*forsterita*) a *serpentinita* puede ser escrito como:



El equilibrio de carbonatos involucrando magnesio es más complicado que en el caso del calcio. Hay varias formas diferentes de carbonato de magnesio e hidroxidocarbonatos y pueden no disolverse reversiblemente. La *magnesita*, $MgCO_3$ es dos veces más soluble que la calcita. Sin embargo, las especies hidratadas *nesquehonita* $MgCO_3 \cdot 3H_2O$ y la *lansfordita*, $MgCO_3 \cdot 5H_2O$ son considerablemente más solubles que la *magnesita*. La *magnesita* no es usualmente precipitada directamente de la disolución pues se necesita un grado considerable de sobresaturación de dicha especie.

2.1.6 Sodio

Es el miembro más abundante del grupo alcalino de la tabla periódica. En rocas ígneas, el sodio es ligeramente más abundante que el potasio, pero en sedimentos, el sodio es mucho menos abundante. Todos los metales alcalinos tienen un estado de oxidación de +1 y no participan en los procesos redox. No hay reacciones de precipitación que puedan mantener una concentración baja de sodio, como el caso de la precipitación de carbonatos que controla la concentración de calcio.

El sodio es retenido por adsorción en las superficies minerales, especialmente en aquellas que tienen capacidades altas de intercambio de cationes como las arcillas. Sin embargo, la interacción entre los sitios superficiales y el sodio, y con iones monovalentes en general es mucho más débil que la interacción con iones divalentes. Los procesos de intercambio de cationes en sistemas de agua dulce tienden a extraer iones divalentes y reemplazarlos con iones monovalentes (Hem, 1985, p. 100).

El ion sodio tiene una solubilidad elevada y es muy difícil de precipitar. Las concentraciones varían entre 1 y 150 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar concentraciones mucho mayores de hasta varios miles de ppm. El agua de mar tiene alrededor de 10000 ppm, las salmueras naturales pueden llegar a tener 100000 ppm. Las aguas con concentraciones elevadas en sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la permeabilidad del suelo (Custodio & Llamas, 1983, p. 203).

Según un estimado de Clarke (1924), cerca del 60% de las rocas ígneas presentes en la corteza de la Tierra consiste en minerales de feldespato. Los feldespatos comunes son la *ortoclasa* y la *microclina* que tienen la fórmula $KAlSi_3O_8$ y la serie de plagioclasa que varían en composición de *albita*, $NaAlSi_3O_8$ hasta *anortita*, $CaAl_2Si_2O_8$. Algo de sodio puede estar presente, sustituyendo al potasio en la *ortoclasa* y *microclina* (Hem, 1985, p. 100).

El feldespato de potasio es resistente al ataque químico. Sin embargo, las especies que contienen sodio y calcio son más susceptibles a la meteorización. Estos feldespatos producen el catión metálico y sílice en disolución y forman por lo general un mineral de arcilla.

En los sedimentos resistivos, el sodio puede estar presente en granos minerales sin alterar, como una impureza en el material cementante o como cristales de sales solubles de sodio precipitados con los sedimentos. En minerales hidrolizados, las partículas normalmente son muy pequeñas, y la circulación del agua a través del material se ve obstaculizada. Por lo tanto, el agua atrapada en el sedimento durante la precipitación de este puede ser retenida junto con sus solutos por periodos largos.

Algunas sales comunes de sodio son $NaCl$ (*halita*), $NaHCO_3$, Na_2CO_3 y $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ (*mirabilita*).

2.1.7 Potasio

El potasio es ligeramente menos común que el sodio en rocas ígneas, pero más abundante en todas las rocas sedimentarias. En el océano la concentración de potasio, aunque sustancial es menor que la del sodio.

El potasio es liberado de las estructuras minerales de silicato con gran dificultad y exhibe una tendencia a ser reincorporado en los productos sólidos de meteorización, especialmente ciertos minerales de arcilla (por ejemplo, montmorillonita e illita). En la mayoría de las aguas naturales, la concentración de potasio es por mucho menor que la del sodio (Hem, 1985, p. 104).

La solubilidad del potasio es muy elevada y es difícil de precipitar. Las concentraciones varían entre 0.1 y 10 ppm en aguas dulces. Extraordinariamente se pueden tener algunos cientos de ppm y sólo muy raramente se puede tener salmueras de hasta 100,000 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 400 ppm (Custodio & Llamas, 1983, p. 203).

El potasio es esencial para plantas y animales. El mantenimiento de la fertilidad de suelos implica proporcionar una fuente disponible de potasio. Los iones de potasio asimilados por las plantas se vuelven disponibles para su disolución cuando las plantas maduran y mueren, o cuando las hojas y otras partes de la planta se caen al final de la temporada de crecimiento. En el reciclaje natural que ocurre en bosques y praderas, este potasio es lixiviado en el suelo por la lluvia durante la temporada latente o se vuelve disponible mediante su descomposición gradual.

Los principales minerales de potasio en rocas silicatadas son los feldespatos *ortoclasa* y *microclina* (KAlSi_3O_8), las *micas* y el feldespatoide *leucita* (KAlSi_2O_6). Los feldespatos de potasio son resistentes a la meteorización por agua.

En los sedimentos, el potasio está por lo común presente como feldespato inalterado, como partículas de mica, *illita* u otro mineral de arcilla.

2.1.8 Azufre

Este elemento se presenta en estados de oxidación que van del S^{2-} al S^{6+} por lo que el comportamiento químico del azufre está relacionado fuertemente con las propiedades redox de los sistemas acuosos. En la forma más oxidada, el azufre forma una estructura coordinada con 4 oxígenos, el anión sulfato. La forma reducida, S^{2-} , forma sulfuro de baja solubilidad con la mayoría de metales. Se estima que cerca de la mitad del azufre presente en la corteza de la Tierra se encuentra en rocas ígneas y metamórficas y que cerca del 7% del total se halla en el agua de mar. El resto se encuentra en

sedimentos. Las principales fuentes naturales de azufre son la meteorización de las rocas, procesos volcánicos, biológicos y bioquímicos.

Un factor principal en el ciclo del azufre es la combustión de carbón y petróleo y otros procesos industriales tal como el derretimiento de menas de sulfuro. Estos procesos producen óxidos de azufre que son parcialmente liberados a la atmósfera. Se considera que las emisiones antropogénicas de azufre son un factor principal en la producción de lluvia de pH bajo y que tiene muchos efectos indeseables en los sistemas ecológicos.

Los procesos de oxidación y reducción que involucran a las especies de azufre son lentos a menos que sean mediadas por microorganismos.

El azufre es ampliamente distribuido en su forma reducida tanto en rocas ígneas como sedimentarias como sulfuros metálicos. Las concentraciones de estos sulfuros por lo general constituyen menas de importancia económica (Hem, 1985, p. 112). Cuando el mineral de sulfuro experimenta meteorización en contacto con agua aireada, el azufre se oxida para producir iones de sulfato los cuales se disuelven en agua.

Los cristales de *pirita* se encuentran en muchas rocas sedimentarias y constituyen una fuente tanto del ion ferroso como de sulfato en el agua subterránea. La *pirita*, en particular, es comúnmente asociada con depósitos biogénicos tal como el carbón, el cual es formado bajo condiciones fuertemente reducidas.

El azufre en forma reducida u oxidada puede ser volatilizado y liberado en grandes cantidades en las regiones volcánicas y puede estar presente en agua geotermal, generalmente en forma oxidada.

El sulfato se presenta en ciertas rocas ígneas del grupo feldespatoide, pero este se encuentra principalmente en sedimentos de evaporita. El sulfato de calcio como yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ o como *anhidrita* (CaSO_4), la cual no tiene agua de cristalización, forma parte de muchas secuencias de roca de evaporita. El sulfato de sodio es formado en algunos lagos de cuenca cerrada.

2.1.9 Alcalinidad (expresada como bicarbonato, HCO_3^- y carbonato, CO_3^{2-})

La alcalinidad de una solución puede ser definida como la capacidad de los solutos que contiene de reaccionar y neutralizar ácido.

La propiedad de alcalinidad debe ser determinada mediante titulación con un ácido fuerte (por lo general ácido clorhídrico). El punto final de la titulación es el pH al cual virtualmente todos los solutos contribuyendo a la alcalinidad han reaccionado. Los mejores valores de punto final para una muestra

en particular dependen de la fuerza iónica y la temperatura. Los procedimientos analíticos pueden especificar un valor de pH entre 4.5 y 5.1, o el punto final de metileno (entre un pH de 4.0 y 4.6).

Algunas veces, sin embargo, una alcalinidad arriba del punto de fenolftaleína es especificada (alrededor de un pH de 8.3).

Varias especies de soluto contribuyen a la alcalinidad del agua, y la titulación con ácido no los identifica. La propiedad de alcalinidad puede ser expresada en términos cuantitativos y en diferentes maneras. La práctica más común es reportarla en términos de bicarbonato y carbonato, por ejemplo, una cantidad equivalente de carbonato de calcio.

En la mayoría de agua natural la alcalinidad es producida por la disociación de las especies de carbono, bicarbonato y carbonato, y la mención de los puntos finales citados anteriormente consideró eso.

Las especies no carbonatadas que contribuyen a la alcalinidad son hidróxido, silicato, borato, y ligandos orgánicos como acetato y propionato. Si la alcalinidad es expresada en miliequivalentes por litro, como el CaCO_3 , las contribuciones de estas especies afectarán el balance catión-anión, solo si algunas de estas especies son determinadas mediante otro método y por lo tanto, son incluidas en los cálculos de balance en dos lugares (Hem, 1985, p. 106).

Excepto para el agua con un pH alto (mayor de 9.5) y algunos otros tipos de agua que contengan una composición química inusual (por ejemplo, agua asociada a petróleo y gas natural), la alcalinidad de aguas naturales puede asignársele a bicarbonato y carbonato disueltos sin mucho error.

La principal fuente de especies de dióxido de carbono que producen alcalinidad en superficie o en agua subterránea es la fracción de CO_2 atmosférico. El contenido de CO_2 de la atmósfera es cerca del 0.03 % de volumen. El aire atrapado de las zonas del suelo y la zona insaturada puede estar sustancialmente enriquecido en dióxido de carbono, debido sobre todo a la respiración de plantas y la oxidación de materia orgánica.

En algunos sistemas naturales, la fuente de dióxido de carbono puede deberse a la reducción de sulfato mediada biológicamente y al metamorfismo de rocas carbonatadas.

2.1.10 Cloruro

El elemento cloro es el más abundante de los halógenos. El comportamiento geoquímico del cloruro refleja la volatilidad del elemento y el hecho de que los compuestos de cloruro con elementos metálicos comunes (metales alcalinos y metales alcalinotérreos) son muy solubles en agua.

Aunque el cloro puede ocurrir en varios estados de oxidación que van desde el Cl^{-1} hasta Cl^{+7} , la forma de cloruro (Cl^{-1}) es la de mayor importancia en agua expuesta a la atmósfera. El gas de cloro se disuelve rápidamente en agua y posee un efecto oxidante más fuerte y rápido que el oxígeno disuelto. Este elemento ha sido usado como desinfectante o biocida en la purificación de suministros de agua (Hem, 1985, p. 117).

Un hecho significativo del cloro es que más de las tres cuartas partes de la cantidad total presente en la corteza externa de la Tierra, atmósfera e hidrósfera está en disolución en el océano como iones cloruro.

Entre las rocas ígneas que presentan cloruro se encuentran el feldespatóide *sodalita*, $\text{Na}_8[\text{Cl}_2(\text{AlSiO}_4)_6]$ y el mineral *apatita*, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH})$. Los minerales en los que el cloruro juega un componente esencial no son muy comunes y es más probable que el cloruro sea una impureza.

En general, las rocas ígneas disponibles para muestreo y análisis geoquímico no producen grandes concentraciones de cloruro en el agua natural circulante. Fuentes más importantes de cloruro son las rocas sedimentarias, particularmente las evaporitas. El cloruro puede estar presente en rocas sedimentarias resistivas por causa de la inclusión de salmuera; también puede estar presente como material cementante y como resultado de la lixiviación de depósitos precipitados en el mar o en una cuenca de drenaje cerrada.

Los iones cloruro no entran en reacciones de oxidación o reducción, no forman complejos de solutos importantes con otros iones a menos que la concentración de cloruro sea alta, no forman sales de baja solubilidad, no son adsorbidos significativamente en las superficies de minerales y no juega un papel bioquímico vital.

El cloruro está presente en todas las aguas naturales, pero sus concentraciones son bajas en la mayoría de corrientes superficiales (de 10 a 250 ppm); las concentraciones de cloruro son más bajas que el sulfato o el bicarbonato (Hem, 1985, p. 118). El agua de mar tiene entre 18000 y 21000 ppm. Entre las aguas naturales pueden darse excepciones donde las corrientes de agua reciben flujos de agua subterránea con alto contenido de cloruro, desechos industriales, o son influidas por las mareas oceánicas.

2.1.11 Nitrógeno

Las rocas de la corteza contienen cerca de un cuarto del nitrógeno total. Los tres cuartos restantes se encuentran en la atmósfera.

Este elemento está presente en estados de oxidación que cubren el rango entre N^{3-} y N^{5+} . La mayor parte de la atmosfera es nitrógeno.

Los procesos por los cuales el N_2 gaseoso es modificado en su estado de oxidación y convertido a compuestos químicos que contienen nitrógeno son referidos como “fijación de nitrógeno”. Se requiere un aporte de energía sustancial porque los dos átomos en la molécula N_2 están fuertemente unidos. La fijación biológica es realizada por las algas azul-verdes (cianobacteria) y ciertos organismos relacionados que tienen la capacidad de realizar fotosíntesis; además la fijación biológica es también realizada por ciertas clases de bacteria que usan material orgánico como fuente de energía. Estas últimas bacterias pueden crecer simbióticamente en las raíces de algunas especies de plantas, principalmente verduras. La fijación inorgánica ocurre naturalmente en la atmósfera, pero las cantidades producidas son pequeñas. La influencia del hombre en el ciclo del nitrógeno consiste en la producción y uso de fertilizantes sintéticos tal como amoníaco y otros compuestos nitrogenados.

El nitrógeno en formas reducidas u orgánicas es convertido mediante bacterias en el suelo a nitrito y nitrato. Este proceso es comúnmente llamado “nitrificación”. El nitrógeno usado por las plantas es principalmente en la forma oxidada. El nitrato en sistemas anaeróbicos puede ser reducido por otras cepas de bacteria a óxido nitroso o gas nitrógeno. Este proceso se conoce como “desnitrificación”.

Los óxidos de nitrógeno están presentes en la atmósfera, en parte, por la utilización de combustibles fósiles. El carbón y el petróleo generalmente contienen cerca de 1% de nitrógeno. Una parte de este 1%, es convertido a óxidos de nitrógeno al quemarse y escapa a la atmósfera. Los óxidos de nitrógeno en la atmósfera pasan a través de varios cambios químicos que producen H^+ , hasta convertirse en nitratos. Estos procesos pueden disminuir el pH de la lluvia de la misma forma que los óxidos de sulfuro.

El nitrógeno se presenta en agua como iones de nitrito o nitrato (NO_2^- y NO_3^-), en su forma catiónica como amonio (NH_4^+) y en estados intermedios como parte de solutos orgánicos. Algunas otras formas como cianuro (CN^-) pueden presentarse en agua debidas a la disposición de residuos provenientes de las minas de oro, de baños de electrodeposición de metales y de la industria manufacturera de joyas (Martínez, A. D., 2012). Las diferencias en las propiedades químicas entre estas especies son sustanciales. Los cationes de amonio son fuertemente adsorbidos sobre las superficies de los minerales. Las especies aniónicas tal como el nitrato son fácilmente transportables en agua y son estables en un rango considerable de condiciones.

El nitrito y las especies orgánicas son inestables y pueden ser indicativas de contaminación. La presencia de nitrato y amonio también pueden indicar contaminación, aunque generalmente esta habrá ocurrido en un sitio y tiempo sustancialmente lejanos al punto de muestreo.

Las concentraciones de nitrógeno son determinadas y reportadas en diferentes maneras en análisis. La mayor parte de laboratorios involucrados en estudios de contaminación orgánica, reportan el nitrógeno como amoníaco, nitrógeno amino y orgánico y/o nitrito de forma separada o en una cantidad combinada en términos de concentración equivalente de nitrógeno elemental. Otros laboratorios que están más interesados en los contenidos orgánicos del agua determinan y reportan únicamente al nitrato (Hem, 1985, p. 124).

La concentración excesiva de nitrato en el agua potable puede causar metahemoglobinemia en niños pequeños. Las concentraciones de nitratos que se aproximan o exceden 44 mg/L de NO_3^- están presentes en muchos pozos de zonas rurales. La mayor parte de los investigadores han atribuido este nitrato al drenaje de establos o tanques sépticos cercanos. Los animales de granja producen considerables cantidades de desecho orgánico nitrogenado que tiende a concentrarse. Otra fuente considerable de nitrógeno se da por lixiviación de fertilizantes en campos irrigados.

2.1.12 Fósforo

El fósforo es un elemento común en las rocas ígneas y es también abundante en los sedimentos, pero las concentraciones presentes en las aguas naturales son normalmente no mayores a 1 mg/l. Las características de la química del fósforo incluyen la poca solubilidad de sus compuestos inorgánicos, y su uso como nutriente por la biota. (Hem, 1985, p. 126)

Sus estados de oxidación pueden variar de P^{3-} a P^{5+} pero la forma completamente oxidable (fosfato) es la única de significancia en la mayoría de los sistemas de agua natural. El mineral más común es la *apatita*, la cual es un fosfato de calcio con cantidades variables de OH^- , Cl^- y F^- (hidroxi, cloro, o fluoro apatita). Algunos minerales de fosfato contienen aluminio o hierro. El fósforo que es liberado al agua de mar por biota marina puede precipitarse como fosforita, un fosfato de calcio impuro.

La minería, concentración y procesamiento del fosfato son fuentes de fosfato en las aguas fluviales. El uso de fosfato en fertilizantes tiene el potencial de incrementar el contenido de fósforo en el drenaje, pero esto se considera un factor minoritario, dado que los fosfatos no son muy móviles en suelo y sedimento. La erosión del suelo puede sin embargo añadir cantidades significativas de fosfato suspendido a las corrientes de agua.

El fósforo es un componente de las aguas residuales, dado que el elemento es esencial para el metabolismo y siempre está presente en los desechos metabólicos de animales. Los desechos domésticos e industriales son una fuente importante de fósforo en las aguas superficiales.

La especie del ortofosfato (PO_4^{3-}) es el último producto de disociación del ácido fosfórico. La disociación del ácido ocurre en pasos y cuatro especies son posibles: $\text{H}_3\text{PO}_4(\text{aq})$, H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} y PO_4^{3-} . En sistemas naturales, el ortofosfato es la especie más estable del fósforo con un estado de oxidación de +5.

Los mayores controles de solubilidad del fósforo están relacionados a la coprecipitación, adsorción, así como consumo por biota. El uso del fósforo por vegetación acuática y la adsorción de iones de fosfato por óxidos de metal (especialmente oxi-hidróxidos férrico y de manganeso) pueden causar que la concentración no sea mayor que unas décimas o centésimas de miligramo por litro.

2.1.13 Hierro

El hierro es el segundo elemento metálico más abundante en la corteza de la Tierra y sin embargo las concentraciones en el agua son pequeñas. El comportamiento químico del hierro y su solubilidad en agua depende en gran medida de la intensidad de la oxidación en el sistema en que ocurre; el pH también influye grandemente. El hierro es un elemento esencial en el metabolismo de los animales y plantas, aunque si este se presenta en el agua en cantidades excesivas, forma precipitados rojos de oxihidróxidos que manchan la ropa y los accesorios de la plomería y por lo tanto el hierro a dichas concentraciones es una impureza desagradable para usos domésticos e industriales (Hem, 1985, p. 77).

La concentración del hierro como Fe^{2+} , varía entre 0 y 10 ppm, siendo de menos de 0.5 ppm en aguas aireadas. Con pH entre 5 y 8 rara vez se llega a 50 ppm (Custodio & Llamas, 1983, p. 205).

Los minerales de rocas ígneas cuyo contenido en hierro es relativamente alto incluye a los *piroxenos*, los *anfíboles*, la *biotita*, la *magnetita* y especialmente el nesosilicato *olivino*.

El hierro en estos minerales está en el estado de oxidación ferroso, Fe^{2+} pero el estado férrico, Fe^{3+} también puede estar presente. Cuando estos minerales son atacados por el agua, el hierro que es liberado vuelve a precipitar como especie sedimentaria. Bajo condiciones reductivas cuando el azufre está disponible, pueden aparecer polisulfuros ferrosos tales como la *pirita* (FeS_2) y *marcasita*. Cuando el azufre es menos abundante, puede formarse *siderita* (FeCO_3). En ambientes oxidantes, las especies sedimentarias serán óxidos férricos o oxihidróxidos como la *hematita*, Fe_2O_3 , y la *goetita*, FeOOH .

El hierro está presente en desechos orgánicos y en restos de plantas en el suelo. La biósfera puede influir en el apareamiento de hierro en el agua.

La forma común de hierro en solución es Fe^{2+} . Este ion tiene una coraza de hidratación octaédrica de seis moléculas de agua. El complejo monohidróxido FeOH^+ puede predominar arriba de un pH de 9.5.

El ion férrico puede darse en disoluciones ácidas como Fe^{3+} , FeOH^{2+} , y $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ y en formas de hidróxido polimerizado, donde la forma predominante y su concentración dependen del pH.

El ion férrico forma complejos inorgánicos con muchos aniones además del OH^- . Los complejos con el cloruro, fluoruro, sulfato o fosfato pueden ser importantes en algunas aguas naturales.

El comportamiento químico del hierro puede predecirse teóricamente como una función del pH de la disolución, potencial de oxidación y actividades de otros iones. Una técnica conveniente para resumir estas propiedades es el diagrama pH-Eh (o pH-potencial redox). Hay una pieza importante de información que es proporcionada por este diagrama: si se especifican las actividades de los solutos, el diagrama puede mostrar áreas de pH-Eh en las que varias especies sólidas serán termodinámicamente estables.

2.2 Balance de aniones y cationes en un análisis químico.

En un análisis químico debe verificarse que: suma de miliequivalentes de aniones = suma de miliequivalentes de cationes.

$$r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-) = r(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}), \text{ donde } r = \text{meq/l}$$

Aunque el NO_3^- puede en general despreciarse si no son aguas contaminadas.

En la práctica existe una diferencia entre ambas cifras que es debida a los errores acumulados de cada una de las determinaciones individuales y a no tener en cuenta las contribuciones iónicas menores (Custodio & Llamas, 1983, p. 223). Si existe una diferencia muy importante, sólo puede darse por la presencia de cantidades anormales de los iones menores o a un error grave de análisis. Si $\sum z m_c$ y $\sum z m_a$ representan respectivamente las sumas de los miliequivalentes de cationes y de aniones, el % de error del balance del análisis viene dado por:

$$\text{error}(\%) = \frac{\sum z m_c - \sum z m_a}{\sum z m_c + \sum z m_a} * 100 \text{ (Ecuación 10)}$$

El error admisible depende un poco de la concentración y del tipo de agua, pero a forma de orientación puede verse en la Tabla 2.3, el error admisible según la conductividad medida:

Tabla 2.3. Error admisible del balance iónico según la conductividad medida
(Adaptado de Custodio y Llamas (1983, p. 223))

Si se da la conductividad, puede calcularse la suma de miliequivalentes y compararlos con los datos contenidos en el análisis, mediante la siguiente relación:

$$\sum z m_c = \sum z m_a = EC/100 (\mu S/cm) \text{ (Ecuación 11)}$$

Esta relación es válida hasta valores de conductividad eléctrica de 1500 $\mu S/cm$ (Appelo & Postma, 2005, p. 19). El cálculo del balance iónico y la comparación con la conductividad eléctrica, como comprobación del análisis químico es únicamente aplicable para los iones mayoritarios.

2.5 Métodos gráficos

2.5.1 Diagrama de Stiff

Una importante tarea en las investigaciones de agua subterránea es la compilación y la presentación de los datos químicos en una forma conveniente. En la Figura 2.2 se presentan diagramas de Stiff. Este diagrama es sencillo de construir y proporciona una rápida comparación visual de análisis químicos individuales. Este diagrama consiste en tres o cuatro ejes horizontales, en cada uno de los cuales se representa un componente seleccionado.

En cada eje, un catión es ploteado a la izquierda y un anión a la derecha, en miliequivalentes por litro. El eje superior tiene Na^+ a la izquierda y Cl^- a la derecha y refleja una posible influencia marina dado que es el agua de mar donde $NaCl$ es la sal dominante. En la parte izquierda de este eje, se incluye además al K^+ .

El segundo eje tiene Ca^{+2} a la izquierda y HCO_3^- a la derecha y este eje está destinado a representar la disolución de $CaCO_3$.

El tercer eje tiene Mg^{2+} a la izquierda y SO_4^{2-} a la derecha, representando los compuestos mayoritarios faltantes. Los valores en cada eje están conectados por líneas y entonces surge una figura típica para una composición de agua específica. El cuarto eje es opcional y sus variables varían de estudio a estudio. Para el presente estudio se eligió la variable Hierro como catión y la variable nitrato como anión del cuarto eje (Appelo & Postma, 2005, p. 9).

En la Figura 2.2, la muestra 1 es agua de lluvia con una baja concentración de todos los componentes. La muestra 4 proviene de un acuífero de caliza donde la disolución de $CaCO_3$ es el proceso predominante generando una forma típica de pájaro. La muestra 3 proviene de un acuífero donde la dolomita, $CaMg(CO_3)_2$ es el mineral que se disuelve y por lo tanto las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} son similares.

Hay que tomar en cuenta que el diagrama de Stiff no es recomendable para la presentación gráfica de grandes cantidades de análisis (Freeze & Cherry, 1979, p. 248).

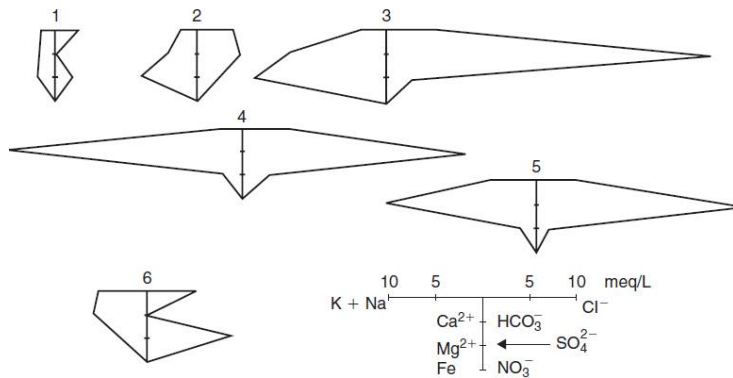


Figura 2.2. Diagrama de Stiff de seis análisis químicos
(Fuente: Appelo y Postma (2005, p. 9))

2.5.2 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper (véase Figura 2.3) permite representar en un mismo gráfico las composiciones de muchas muestras de forma que puedan observarse con facilidad las tendencias de los datos.

Este diagrama consiste en dos triángulos para la representación de los cationes y aniones en forma de porcentajes. Estas cifras en porcentajes se calculan a partir de las concentraciones en miliequivalentes/L de los iones.

El triángulo para cationes tiene 100% Ca²⁺ en la esquina izquierda, 100% Na⁺ + K⁺ hacia la derecha y 100% Mg²⁺ hacia arriba. Para los aniones, el triángulo tiene 100% de CO₃/HCO₃ a la izquierda, Cl⁻ a la derecha y SO₄²⁻ arriba. Los dos puntos en los triángulos se unen en el diamante central.

Este diagrama es conveniente para mostrar los efectos de la mezcla de aguas de orígenes distintos. La mezcla de dos aguas distintas se graficará en la línea recta que une ambos puntos. En el diagrama de Piper es posible agrupar los datos según grupos identificables o categorías. Por esta razón, se desarrolló el concepto de facies hidroquímicas (Freeze & Cherry, 1979, p. 249).

Las facies hidroquímicas son zonas distintivas que tienen concentraciones de cationes y aniones que pueden describirse dentro de categorías de composición definidas. La definición de una categoría de composición es comúnmente basada en subdivisiones del diagrama trilíneal, tal y como se muestra en la Figura 2.4 (Freeze & Cherry, 1979, p. 252).

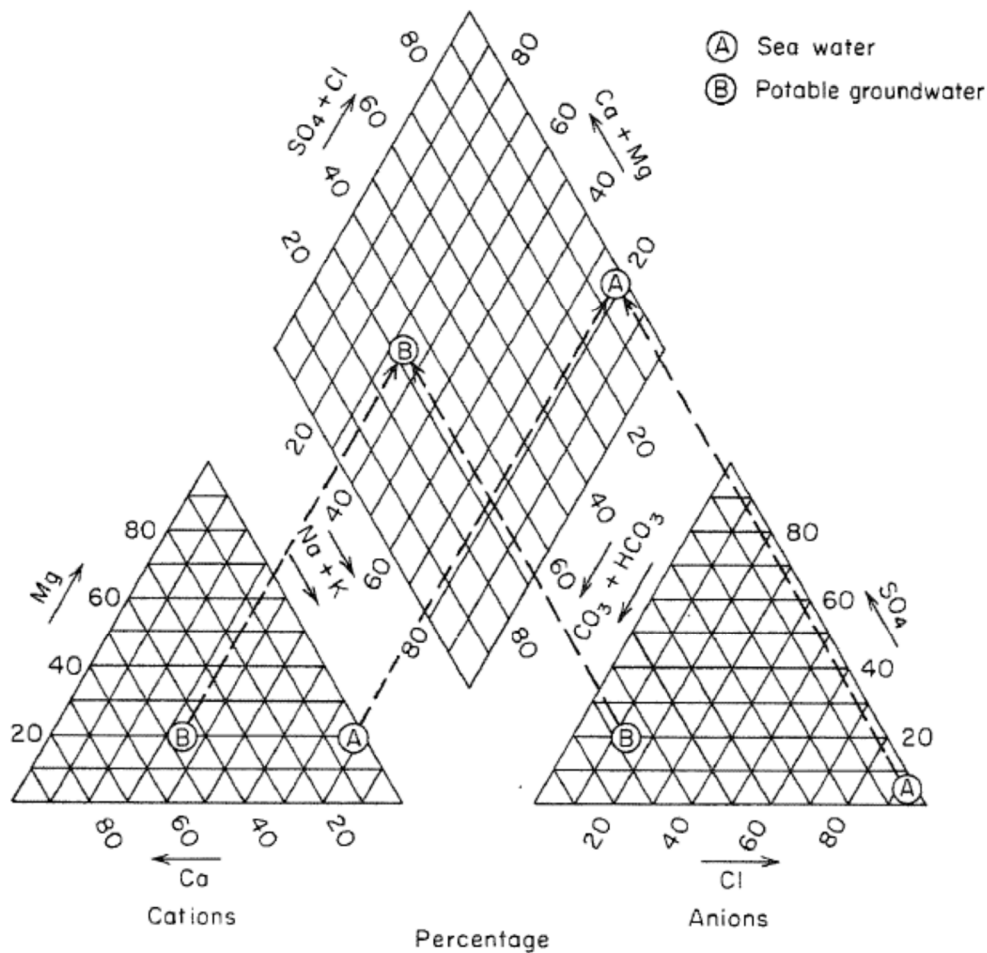


Figura 2.3. Diagrama de Piper

(Fuente: Freeze y Cherry (1979, p. 250))

El diagrama de diamante forma la base de una terminología de la composición química del agua. Por ejemplo, un agua de tipo cálcica bicarbonatada se ploteará cerca del lado izquierdo del diamante mientras que un tipo sódico-bicarbonatada se ubicará cerca de la esquina inferior.

2.5.3 Mapa de isólinas

Cualquier fenómeno que varíe en magnitud en forma continua en los distintos puntos de un territorio es susceptible de representarse mediante isólinas. Las curvas que se representan en el mapa son las que separan zonas de distintos valores característicos de la distribución, y que llamamos isólinas. Es importante destacar que, en la elaboración de este tipo de mapa, la representación total ha de obtenerse

a partir de un número limitado de observaciones y que el dibujo de las isolíneas procede por tanto de interpolación. De toda la población estadística, número infinito de puntos, se eligen una muestra característica en la que efectuar dichas observaciones, y tener así datos suficientes adecuadamente distribuidos para una posterior interpolación.

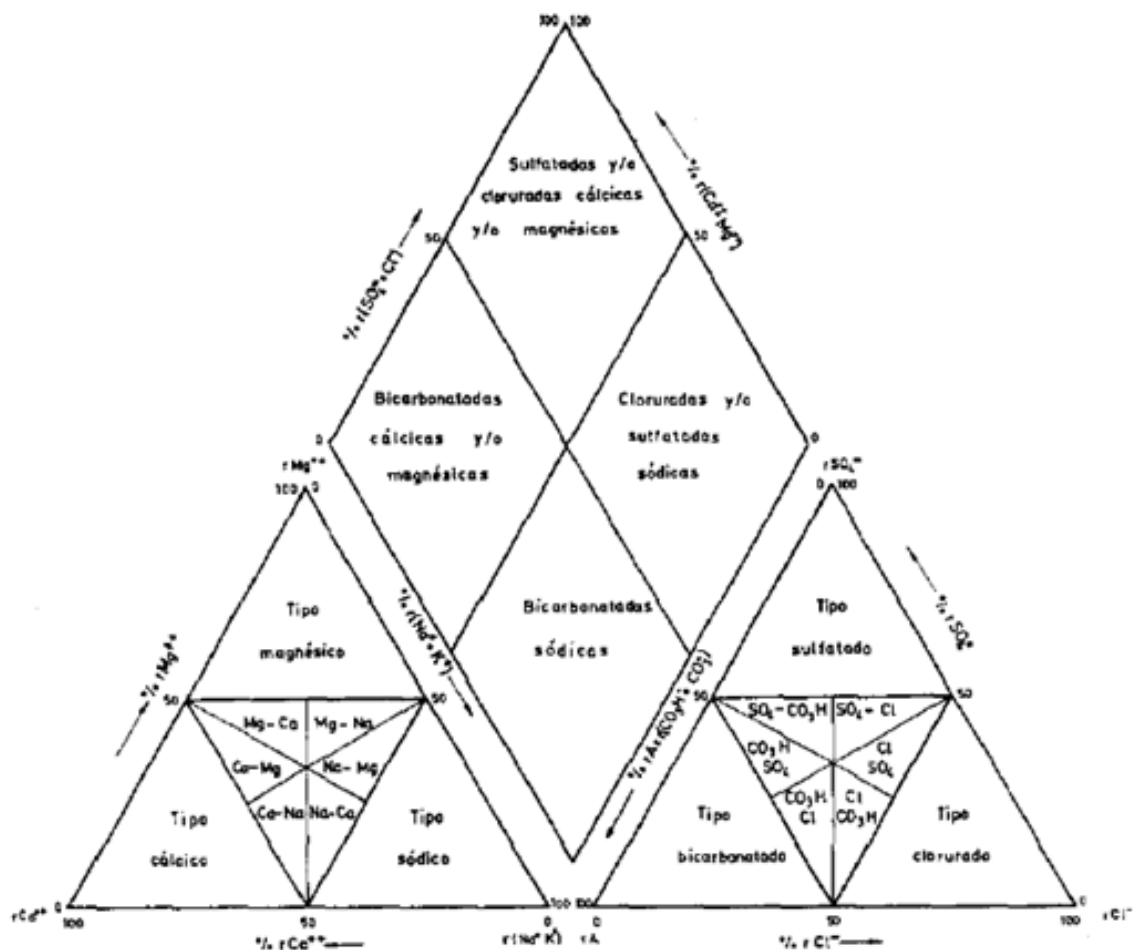


Figura 2.4. Facies hidroquímicas en que se subdivide el diagrama de Piper

(Fuente: Custodio y Llamas (1983, p. 1060))

2.5.3.1 Construcción del mapa de isolíneas

De forma general los pasos a seguir para la elaboración de un mapa de isolíneas son los siguientes:

- Observación del dato en una serie suficiente de puntos. La situación de los puntos de control (en donde se efectúa la medida) es en muchos casos conocida y viene de alguna manera impuesta (por la propia ubicación de los observatorios meteorológicos, por ejemplo). El número de puntos de control es importante ya que a mayor cantidad mejor será la representación. El grado de exactitud aumenta espectacularmente con dicho número, aunque también es verdad que sobrepasado un cierto límite no existe mejora en la calidad de lo representado. Por ello se debe tratar de equilibrar el nivel de exactitud que se pretenda conseguir valorando el coste que supone la obtención de un mayor número de puntos.
- Inferencia de valores al resto de la zona (interpolación). Para la mayor cantidad de fenómenos, se estiman los valores intermedios trazando isolíneas partiendo de los datos conocidos y asumiendo la continuidad del fenómeno representado. Se sitúan las líneas entre los puntos a distancias proporcionales según sea la z de los puntos adyacentes. Esto equivale a suponer la continuidad del fenómeno y un gradiente lineal entre las z conocidas, lo cual no siempre es cierto (por ejemplo, en la densidad de población en zonas urbanas). Para curvas trazadas manualmente se asume un gradiente lineal en la construcción de las isolíneas. Pero si existen y se conocen teorías para tener en cuenta (como en la densidad de población en donde el gradiente tiende a ser curvilíneo) hay que aplicarlas. Para ello utilizaremos aplicaciones informáticas que permitan elegir otros sistemas de interpolación no lineales y que se ajusten más a la distribución a representar. Al utilizar este método de cartografiado cuantitativo el número de puntos de control, sus localizaciones y el modelo de interpolación seleccionado son tres factores determinantes, que afectarán conjuntamente a la exactitud del trazado de las isolíneas. El tipo de interpolación a utilizar para este trabajo de graduación es el de B-spline multinivel, puesto que es ideal para el tratamiento de datos dispersos. Estos datos dispersos se generan por lo común de la medición no uniforme de cantidades físicas en campos como la geología, meteorología, oceanografía, cartografía y minería (Lee et al., 1997).

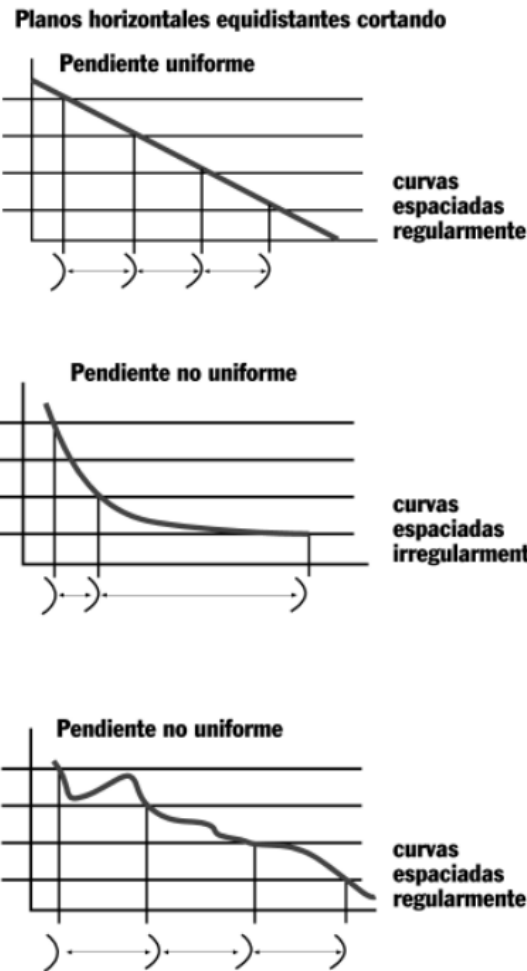


Figura 2.5 Tipos de pendiente utilizadas en mapas de isolíneas
(Adaptado de Capítulo 5 Mapas de isolíneas (n.d.))

- Selección de intervalos. Es imposible mostrar todas las curvas, y debemos por lo tanto decidir cuáles figurarán en el mapa. Lo más adecuado en un mapa de isolíneas es que los intervalos sean iguales, o, dicho de otro modo, que los planos horizontales que cortan la superficie estadística, sean equidistantes (véase Figura 2.5). No obstante, la utilización de un único intervalo puede resultar difícil en muchos casos porque a menudo las distribuciones geográficas presentan grandes inclinaciones o rangos de valores extremos muy amplios (véase Figura 2.6). Ello puede llevarnos a elegir algún otro tipo de intervalos, para lo cual puede resultar útil algún método gráfico como una curva de frecuencias o un gráfico de dispersión.

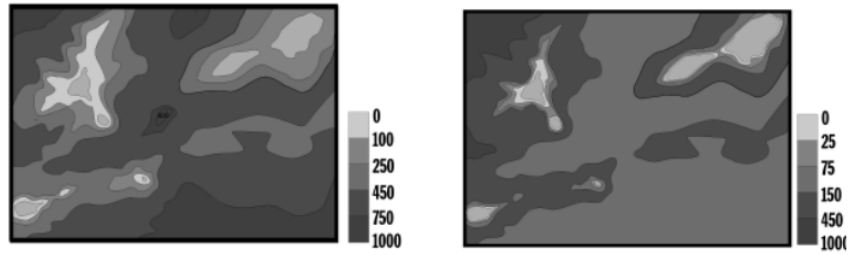


Figura 2.6. Utilización de distintos intervalos de clase para representar una misma topografía submarina.

Adaptado de Capítulo 5. Mapas de isolíneas (n.d.)

- Diseño del mapa; colores, líneas, rótulos. Si no se utilizan colores debe procurarse la dominancia visual de las líneas en el mapa, para lo que se utilizarán líneas sólidas y de grosor suficiente para asegurar que destacan sobre el resto de los elementos gráficos.

Entre las ventajas de los mapas de isolíneas se encuentran que estos mapas muestran la distribución total de la variación espacial de un fenómeno. Además, permiten tomar medidas para cualquier punto del mapa, ya que la interpolación es posible. Por otro lado, se adapta fácilmente a distintos niveles de precisión y detalle, por lo que podemos considerarlo un sistema flexible.

2.6 Clasificaciones geoquímicas

Para realizar la clasificación por los iones dominantes, se nombra el agua por el anión o el catión que sobrepasa al 50% de sus sumas respectivas; si ninguno supera el 50% se nombran los dos más abundantes. Si conviene se puede añadir el nombre de algún ion menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta.

Para simplificar la expresión a cada posible ordenación de aniones y cationes se les da un número y una letra que sirven para denominar el agua. Cuanto interese resaltar además la mineralización total del agua se puede añadir una clasificación de acuerdo con la conductividad.

Los grupos que surgen se muestran en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4. Grupos hidrogeoquímicos que se forman según sea concentración de los distintos iones en la muestra de agua

Aniones	Cationes
1 $r_{Cl} > r_{SO4} > r_{CO3H}$	a $r_{Na} > r_{Mg} > r_{Ca}$
2 $r_{Cl} > r_{CO3H} > r_{SO4}$	b $r_{Na} > r_{Ca} > r_{Mg}$
3 $r_{SO4} > r_{Cl} > r_{CO3H}$	c $r_{Mg} > r_{Na} > r_{Ca}$
4 $r_{SO4} > r_{CO3H} > r_{Cl}$	d $r_{Mg} > r_{Ca} > r_{Na}$
5 $r_{CO3H} > r_{Cl} > r_{SO4}$	e $r_{Ca} > r_{Na} > r_{Mg}$
6 $r_{CO3H} > r_{SO4} > r_{Cl}$	f $r_{Ca} > r_{Mg} > r_{Na}$

La r para cada ion se refiere a su concentración en meq/L

Asimismo, los valores de conductividad se agrupan de la siguiente forma (Custodio & Llamas, 1983, p. 1093):

C-1 Conductividad a 25°C entre 0 y 250 uS/cm

C-2 Conductividad a 25°C entre 250 y 750 uS/cm

C-3 Conductividad a 25°C entre 750 y 2250 uS/cm

C-4 Conductividad a 25°C mayor que 2250 uS/cm

2.7 Resumen del capítulo

Se ha explicado las variables que se utilizarán para describir las características hidrogeoquímicas de la zona de estudio. Las variables a tomar en cuenta son: los sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica específica, pH, alcalinidad, concentración de ion calcio, de ion magnesio, de ion sodio, de ion potasio, de ion sulfato, de ion cloruro, de ion nitrato, de ion fosfato y de ion hierro. Se ha considerado la forma de verificar la validez de un análisis a través del balance de electroneutralidad. Además, se han introducido los métodos gráficos a usar como son el diagrama de Stiff y el diagrama de Piper. Se ha especificado el conjunto de pasos a seguir para la elaboración de un mapa de isolíneas y las ventajas que tiene este tipo de mapa.

También, se ha expuesto los distintos tipos hidrogeoquímicos que se forman con base al diagrama de Piper. En el siguiente capítulo se presentará el marco metodológico de la presente investigación.

Capítulo 3 Marco Metodológico

Las actividades realizadas en la presente investigación se agrupan de la siguiente forma:

- Trabajo de gabinete.
- Trabajo de campo.
- Análisis e interpretación de resultados.

El trabajo de gabinete consistió en aquellas actividades de preparación para el viaje de campo y elaboración del documento de la tesis. Aquí tenemos el contacto con los encargados de las juntas de agua, préstamo de vehículo apropiado para el terreno y la documentación bibliográfica que servirá de base para la redacción de los distintos capítulos de la tesis y el análisis de resultados.

En el trabajo de campo, se encuentran básicamente las actividades de toma de muestras de río, pozo perforado y manantial; la entrega de muestras al laboratorio y recepción de resultados. Finalmente, en análisis e interpretación de resultados, se expone los procedimientos llevados a cabo para elaborar los diagramas de Piper, Stiff y el mapa de isoconcentraciones.

3.1 Trabajo de gabinete

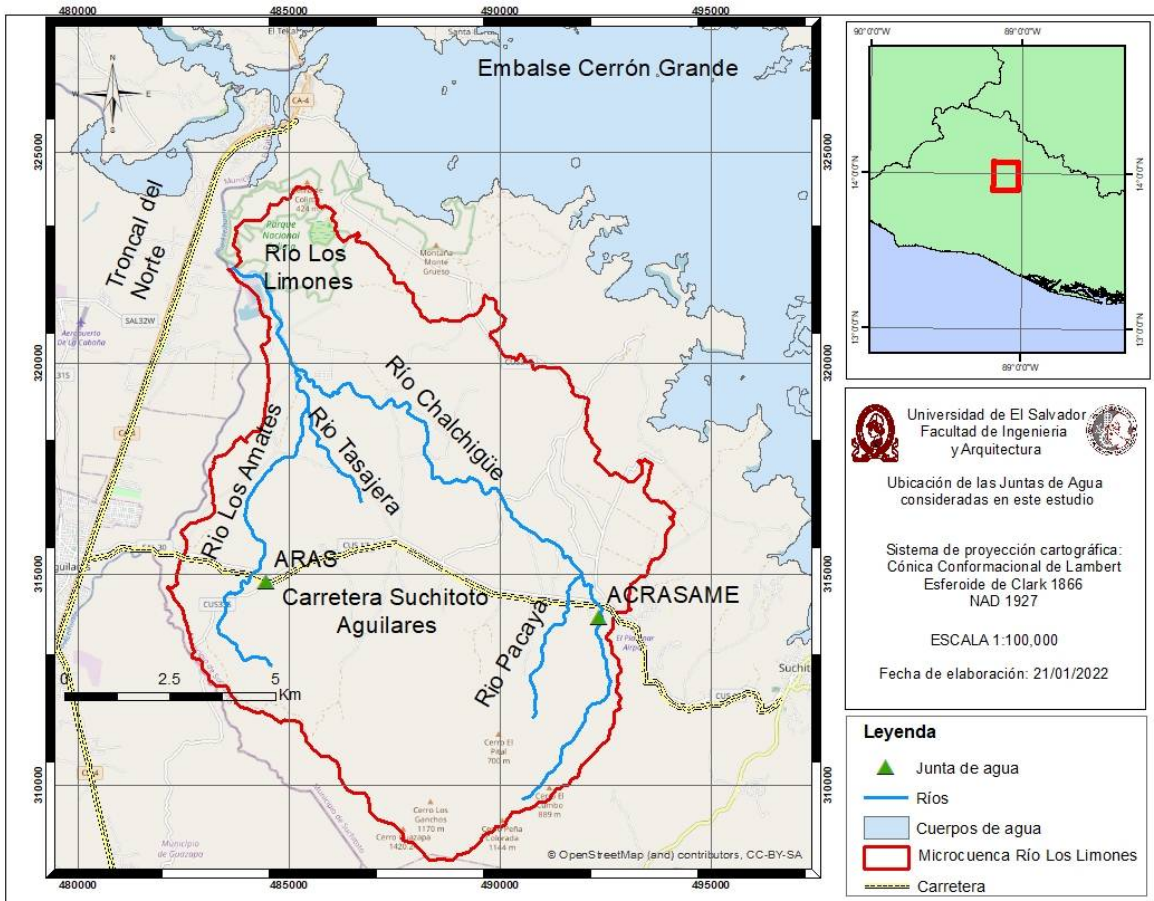
El trabajo de gabinete implicó:

- * Contacto con los administradores de las juntas de agua: ACRASAME y ARAS.
- * Préstamo del vehículo
- * Documentación bibliográfica

Estas actividades se describen a continuación.

Contacto con los administradores de las juntas de agua: ACRASAME Y ARAS

La junta de agua ACRASAME la conforman las comunidades La Mora, Santa Fe, Nuevo Renacer, El Sitio Zapotal, Puertas de San Antonio, La Ceiba, San Antonio del Monte, Valle Verde, Celina Ramos y San Pablo El Cereto.



Mapa 3.1. Ubicación de Juntas de Agua consideradas en este estudio

Hasta 2013, el número de acometidas era de 468 activas. El sistema se abastece de un pozo perforado, con una profundidad de 160 m, posee agua suficiente para abastecer a las comunidades, cuyo caudal oscila en: 25.73 l/s, tiene una tubería de aducción por impulsión de 4" de HG (Hierro Galvanizado), y se complementa con una tubería de 4" de PVC, hasta llegar al tanque de distribución y almacenamiento de 180 m³, construido de estructura de concreto armado, del cual se abastece la comunidad, y para ello poseen 4 tanquillas rompe presión, y la red de distribución oscila en 10 km de longitud aproximadamente (Hernández Rodríguez, 2013, p. 73).

El sistema de agua ARAS comprende en total 5 comunidades: Apolinario Serrano, Chaguitón, Líbano, El Trapiche, San Francisco y Papayán. Es un sistema que lo comparte el cantón San Lucas y Buena Vista, de Suchitoto, actualmente posee un total de 236 acometidas activas.

El sistema se abastece de un pozo perforado ubicado en la comunidad El Líbano, cuya profundidad del pozo es de 100 m, la bomba es de 25 HP (Caballos de fuerza), la cual impulsa el agua por 500 m

de tubería de HG y PVC de 4", hasta llegar a un tanque de 85 m³, del cual se distribuye agua a las 5 comunidades. En el año 2010, con el apoyo de FOMILENIO se amplió el sistema a las comunidades San Francisco y El Trapiche (Hernández Rodríguez, 2013, p. 73).

Los contactos con estos sistemas de agua se realizaron mediante la alcaldía de Suchitoto y el Foro del Agua.

Préstamo del vehículo

Se solicitó a ISCOS (Instituto Sindical para la Cooperación al Desarrollo, una ONG con sede en el municipio de Suchitoto) vehículo y acompañamiento para ir a los puntos de muestreo. La solicitud del vehículo fue realizada con un mes de anticipación.

Documentación bibliográfica

Se realizó la búsqueda de documentos que sirvieran para fundamentar este trabajo de graduación. Estos documentos fueron solicitados en ANDA y MARN. Entre los documentos consultados están informes de pozos y archivos shapefiles donde se detallaba la geología del municipio de Suchitoto. Además, se consultaron libros relacionados con el tema de investigación como "Study and Interpretation of the Natural Characteristics of Natural Water" de John D. Hem (1985), tercera edición.

3.2 Trabajo de campo

Como actividades de trabajo de campo tenemos la toma de muestras y la entrega de muestras al laboratorio y recepción de resultados.

Toma de muestras

Esta actividad implicó:

- * La preparación del equipo para la toma de parámetros de campo
- * Etiquetado de las botellas de muestreo

* Toma de parámetros de campo y muestreo de río, manantial y/o pozo

* Preservación de las muestras

A continuación, se explica brevemente cada uno de los pasos realizados durante la fase de toma de muestras.

La preparación del equipo para la toma de parámetros de campo

El equipo utilizado para la toma de parámetros de campo fue la sonda multiparamétrica AP-5000. Antes de ocupar dicha sonda se verificó que las baterías utilizadas le proporcionan suficiente energía a la sonda para operar. Además, se calibró la sonda con la disolución Rapid Cal, la cual venía con la sonda. Para calibrar se hizo lo siguiente (Aquaread, 2019):

- Se llenó uno de los dos frascos de calibración proporcionados en el estuche de la sonda con la disolución Rapid Cal (aproximadamente 500 ml).
- Se desacopló el protector de la sonda y remover el tapón del electrodo de pH/ORP.
- Se volvió a acoplar el protector de la sonda
- Se sumergió la sonda AP-5000 en el frasco de calibración.
- Al hacerlo, se golpeó con delicadeza el fondo del recipiente de calibración con el fin de desalojar cualquier burbuja de aire.

Luego se esperó que todas las lecturas estuvieran completamente estables. Se recomienda que el periodo de espera sea de un mínimo de 2 minutos para permitir que la sonda alcance el equilibrio térmico.

- Se presionó la tecla MENU y luego se seleccionó Calibración. Apareció la siguiente pantalla.

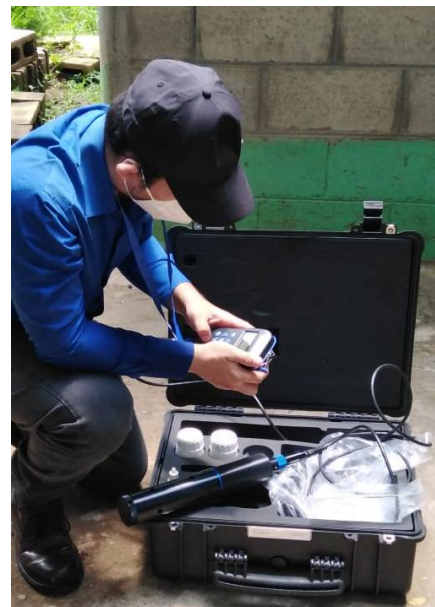


Figura 3.1 Sonda multiparamétrica AP-5000

```
Calibration
→ RapidCal
DO 100%
Full Cal
```

- Se seleccionó RapidCal. La pantalla cambió a:

```
PLEASE WAIT
Stabilising
000%
```

- Se esperó hasta que las lecturas estuvieran estables. Durante la calibración, apareció la pantalla de Calibración y se observó cómo cambió el contador de progreso. Cuando se completó el proceso de carga (el contador alcanzó 100%), apareció la siguiente pantalla:

```
Calibrating
100%
Press [OK]
```

- Una vez la calibración estuvo completa, se presionó OK luego ESC para regresar al modo normal de lectura.



Figura 3.2 Etiquetado de muestras

Etiquetado de las botellas para muestreo.

La identificación de las muestras consistió en la asignación de un código a la muestra basándose en el cuerpo de agua muestreado. También se agregaron datos adicionales como fecha y hora del muestreo, lectura de pH y temperatura. El etiquetado se realizó con un marcador permanente. Luego se pegó la etiqueta bien con cinta adhesiva.

Toma de parámetros de campo y muestreo de río, manantial o pozo

Antes de muestrear se registraron las lecturas de los parámetros de campo con la sonda AP-5000: coordenadas geográficas, pH, temperatura, oxígeno disuelto y potencial de reducción, variables que se tomarán en cuenta en la elaboración de diagramas de boxplot, gráficos de línea y diagramas de probabilidad normal. Para esta actividad, se verificó que se que el tapón del electrodo de pH/ORP estuviera removido. Después de concluir la lectura de parámetros se comprobó que el tapón estuviera en su lugar de nuevo con suficiente disolución de almacenamiento, puesto que el electrodo de pH/ORP no debe secarse.

Para el muestreo se utilizaron guantes en todo momento para evitar contaminar las muestras. En el caso de un río, se debe tomar en cuenta la

dirección de la corriente, de forma que no se vaya a contaminar el agua a muestrear. Para el muestreo en pozo, se solicitó al dueño o supervisor del sistema de agua que el pozo sea purgado por unos 5 minutos; con esto se evita muestrear agua estancada que no represente las condiciones fisicoquímicas del acuífero.

Al muestrear se ambientó primero el frasco con el agua, para ello se enjuagó hasta tres veces el frasco muestreador. Se procuró en la medida de lo posible que el frasco se llenara completamente con agua. Para el caso de la muestra de cationes se dejó espacio suficiente para agregar el ácido. Considerando lo anterior se seleccionaron 5 puntos de muestreo para la época seca y época lluviosa, los cuales



Figura 3.3 Lectura de parámetros de campo



Figura 3.4. Muestreo de manantial El Borbollón

fueron: PCHAL-01 y RCHAL-01³ ubicados en la cercanía del sistema de agua ACRASAME, PAPOL-01 ubicado en la junta de agua ARAS, MBORBO-01 localizado en el manantial el Borbollón adyacente al río Los Amates, y finalmente, RLIM-01 ubicado en la confluencia del río Los Limones con el río Los Amates y Chalchigüe. Adicionalmente a estos puntos de muestreo, se eligieron puntos adicionales para toma de parámetros de campo. Estos puntos se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Puntos adicionales para la toma de parámetros de campo

Época lluviosa	Época seca
MSANTO	RLIM-02
MZAP-01*	
MZAP-02*	

Con respecto a MSANTO, MZAP-01 y MZAP-02, todos manantiales, se ubican en la zona del nacimiento del río Chalchigüe, tal y como se observa en el Mapa 4.1. RLIM-02 se encuentra en el río Los Limones aguas debajo de RLIM-01.

Preservación de las muestras

Para este paso, se solicitó 50 ml de ácido nítrico concentrado por temporada de muestreo a la Escuela de Ingeniería Química, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador.

Para preservar las muestras de cationes, se agregaron 1 ml de ácido nítrico concentrado a un 1 L de muestra. Esto se realizó para evitar que los cationes precipiten.

Luego las muestras se almacenaron en una hielera de forma que la temperatura de las muestras no superara los 4°C y así retardar lo más posible las reacciones que se llevan a cabo en el agua muestreada, hasta el momento en que sea analizada.



Figura 3.5 Preservación de muestras

³ En la época seca no fue posible muestrear en RCHAL-01, por lo que se cambió el sitio de muestreo por RLIM-02.

Entrega de las muestras al laboratorio y recepción de resultados

Se contrataron los servicios del Laboratorio de la Fundación Salvadoreña para el Desarrollo Económico y Social (FUSADES) en 2021 y 2022. El método de laboratorio empleado para realizar los análisis se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 3.2 Método de laboratorio empleado para análisis de iones mayoritarios

Parámetro	Método de laboratorio empleado
Calcio	Espectrofotometría de absorción atómica
Magnesio	Espectrofotometría de absorción atómica
Potasio	Espectrofotometría de absorción atómica
Sodio	Espectrofotometría de absorción atómica
Fosfatos	Método de ácido ascórbico
Sulfatos	Turbidimetría
Cloruros	Método argentométrico
Nitratos	Espectrofotometría UV
Hierro	Espectrofotometría de absorción atómica
Carbonato y bicarbonato	Método de titulación

Las muestras fueron recolectadas utilizando frascos de plástico, proporcionados por el laboratorio.

Se emplearon:

-1 Frasco de 1 L para aniones mayoritarios por punto de muestreo

-1 Frasco de 1 L para cationes mayoritarios por punto de muestreo

Se eligieron 5 puntos de muestreo para un total de 10 muestras (5 para cationes y 5 para aniones) por estación. Los resultados se obtuvieron dentro de los 15 días hábiles.

3.3 Análisis e interpretación de resultados

El análisis e interpretación de resultados se llevó a cabo utilizando el siguiente software:

- Diagrammes, versión 6.75.
- OriginPro 2021b (64-bit, Learning Edition), versión 9.8.5.204.
- SAGA GIS (64 bits), versión 2.3.2.
- QGIS, versión 3.16.7 -Hannover.
- ArcGIS Desktop, Version 10.5.0.6491.
- Microsoft Excel, de Microsoft 365.

El Datum ocupado en los distintos archivos shape fue North American Datum 1927 y el sistema de proyección de coordenadas es Cónica Conforme de Lambert.

3.3.1 Diagrama de Piper

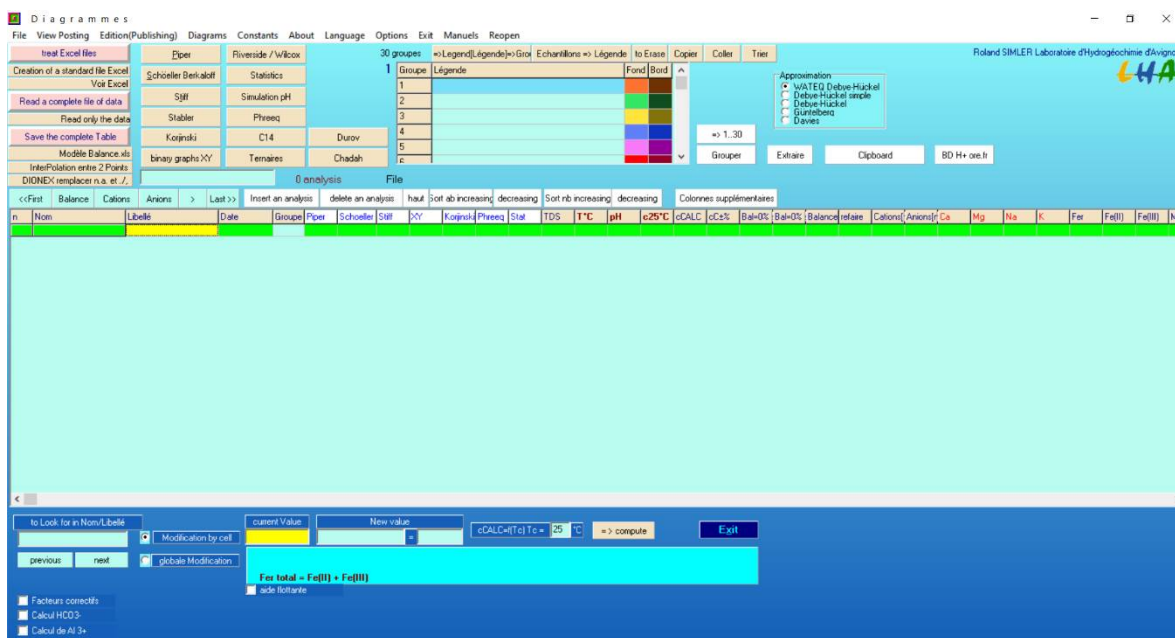


Figura 3.6. Interfaz gráfica de Diagrammes

(véase Simler, R (2021))

Para el análisis de resultados se utilizó el programa Diagrammes, para la elaboración de diagramas de Piper. La interfaz gráfica del programa se muestra en la Figura 3.6. Se utilizó el tutorial proporcionado en el blog de Villegas (2011).



Figura 3.7 Botón de creación de plantilla Excel

Abierto el programa se hizo click en Creation of a standard file Excel. Esta opción creó una plantilla de Excel para completar. Esta plantilla contenía las siguientes columnas: n (número de muestra), Nom (el nombre del lugar), Libellé (el código del lugar de muestreo), Groupe (se refiere a los grupos de aguas similares presentes en los lugares de muestreo), T°C (temperatura en grados centígrados), pH, c25°C (conductividad a 25°C), eH (potencial redox) y las concentraciones de los gases disueltos y compuestos mayoritarios y minoritarios que son: O₂, Ca, Mg, Na, K, HCO₃⁻, CO₃, CO₂, F, Cl, Br, SO₄, PO₄, NO₂, NO₃, SiO₂, H₄SiO₄, HS⁻, S²⁻, Fe, Fe(II), Fe(III), Mn, Sr, Li⁺, Al, NH₄, ¹⁸O, ¹³C, ¹⁴C, ²H, ³H, TAC, TOC y densidad.

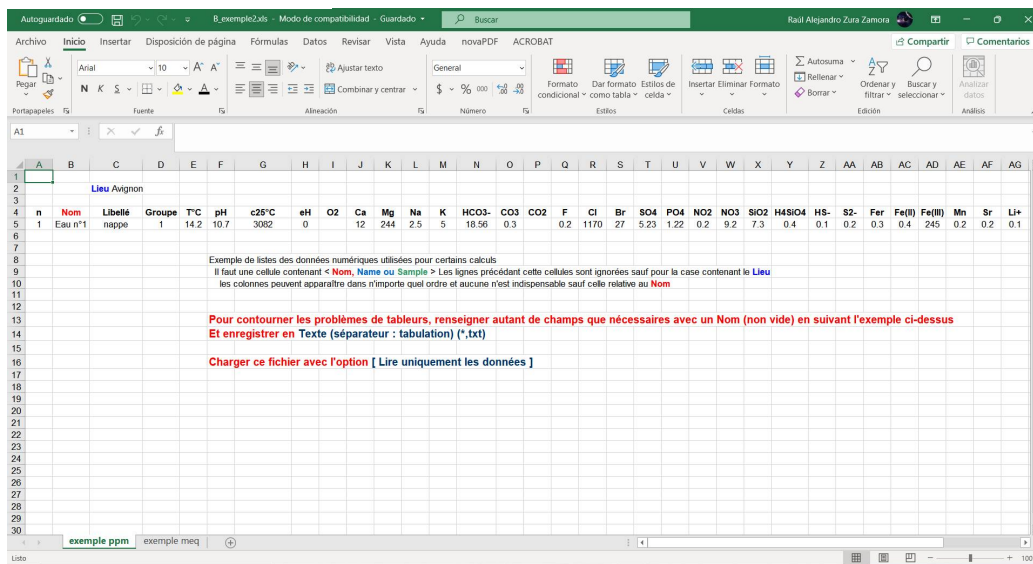


Figura 3.8. Plantilla de Excel.

De la plantilla únicamente se llenaron los campos a utilizar. Una vez guardada la plantilla, se hizo click en el botón Treat Excel files de Diagrammes y se buscó el directorio donde se guardó el archivo. El resultado fue el siguiente:

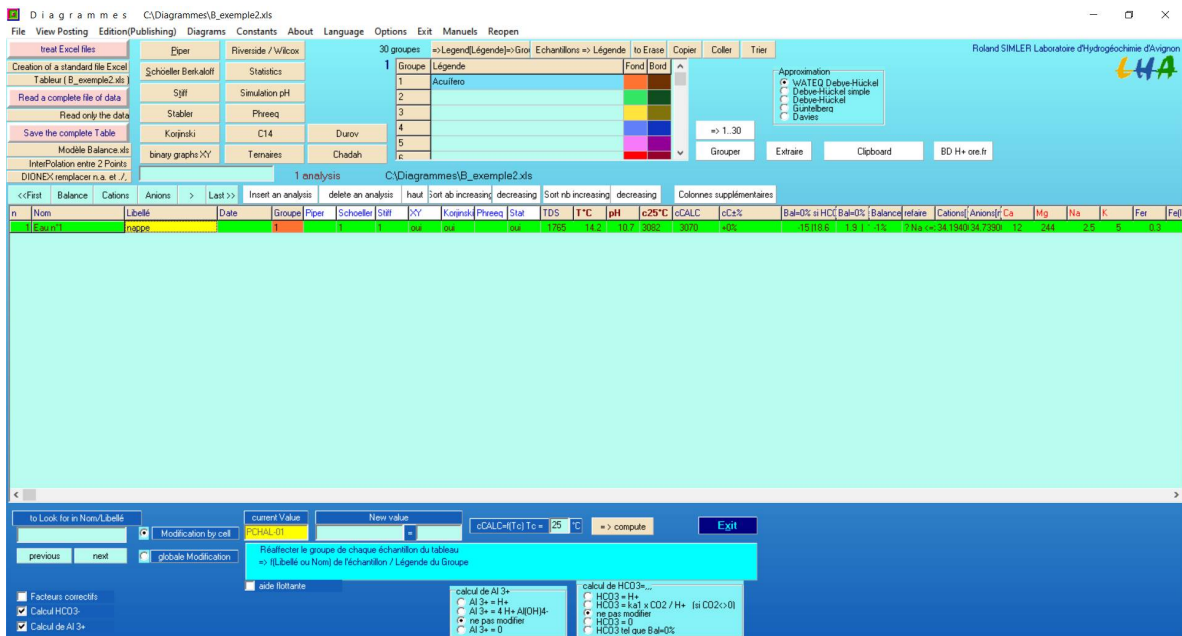


Figura 3.9. Datos cargados de la plantilla de Excel
(véase Simler, R (2021))-

Se completó la columna Groupe, ingresando un número para identificar el tipo de agua, de acuerdo con el recuadro Légende. Se completó el campo con un 1 y se presionó el botón Piper, apareció lo siguiente:

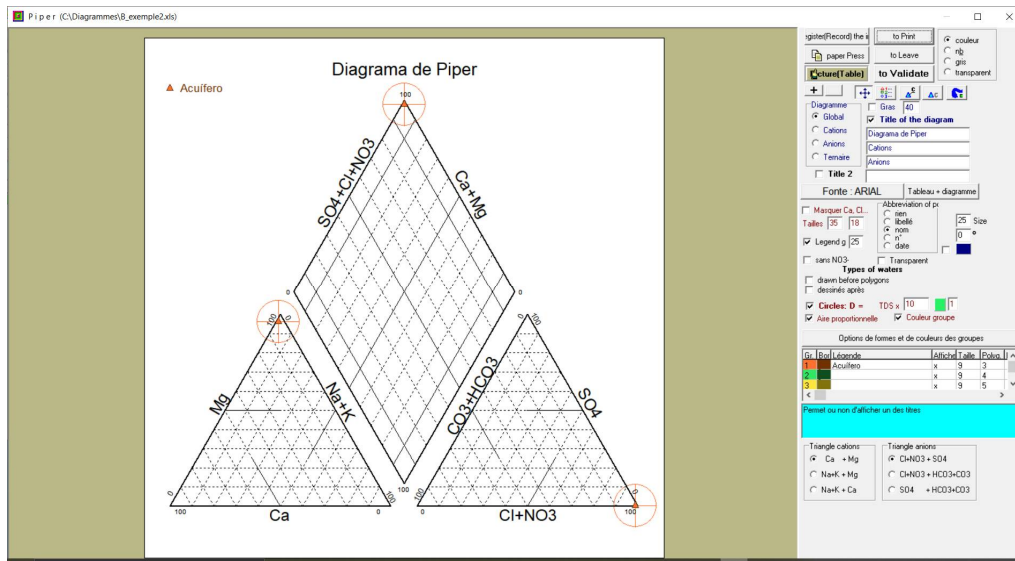


Figura 3.10. Diagrama de Piper
(véase Simler, R (2021))

Finalmente se presionó el botón “to Print” y se obtuvo un archivo pdf con el diagrama de Piper.

3.3.2 Diagrama de Stiff

En el caso de los diagramas de Stiff se ocupó el programa OriginPro 2021b (Learning Edition)).

Lo primero que se hizo fue completar una hoja de cálculo con las concentraciones en mg/l de los distintos iones y datos como la longitud y la latitud. Se crearon dos filas: Group y Conversion Factors. En la fila Group se colocaron números que identificaban a los grupos a formar para la elaboración del gráfico de Stiff. Por ejemplo, para plotear el Na y el K juntos, se identifica al grupo como 1 para ambos. En la fila Conversion Factors, se colocaron los factores de conversión a utilizar para convertir las concentraciones de mg/l a meq/l (véase Figura 3.11).

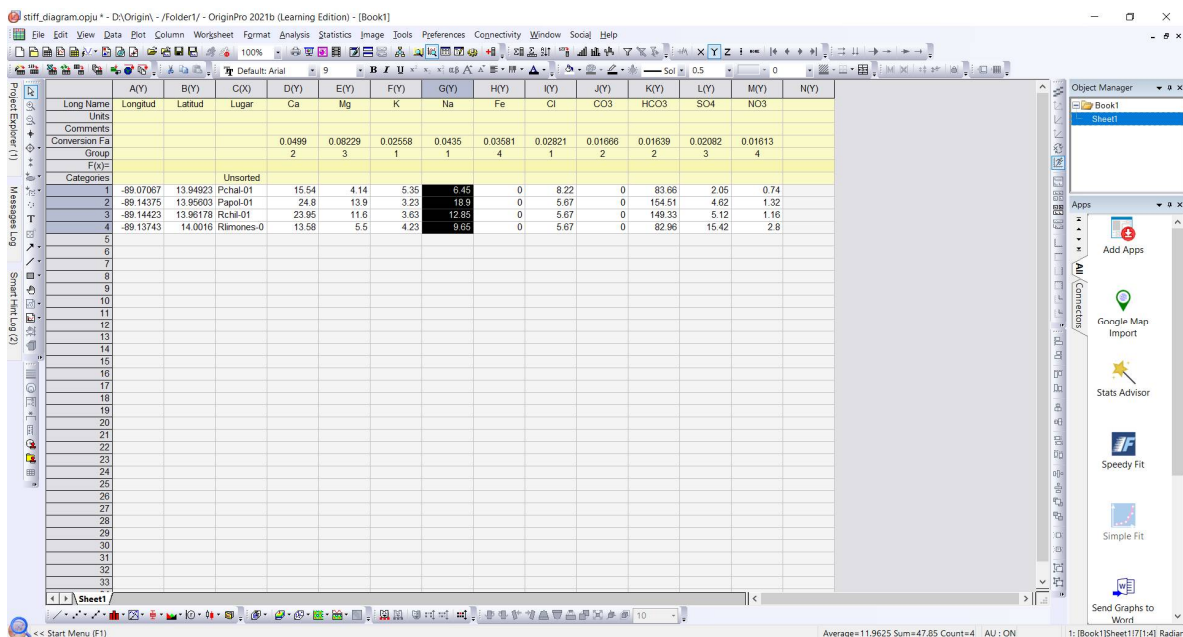


Figura 3.11. Hoja de cálculo a completar para graficado en diagramas de Stiff (véase OriginLab Corporation (2021))

Se seleccionaron los datos a graficar en la hoja de cálculo (véase Figura 3.12). Luego se buscó el menú Plot, se eligió Specialized y luego Stiff (véase Figura 3.13).

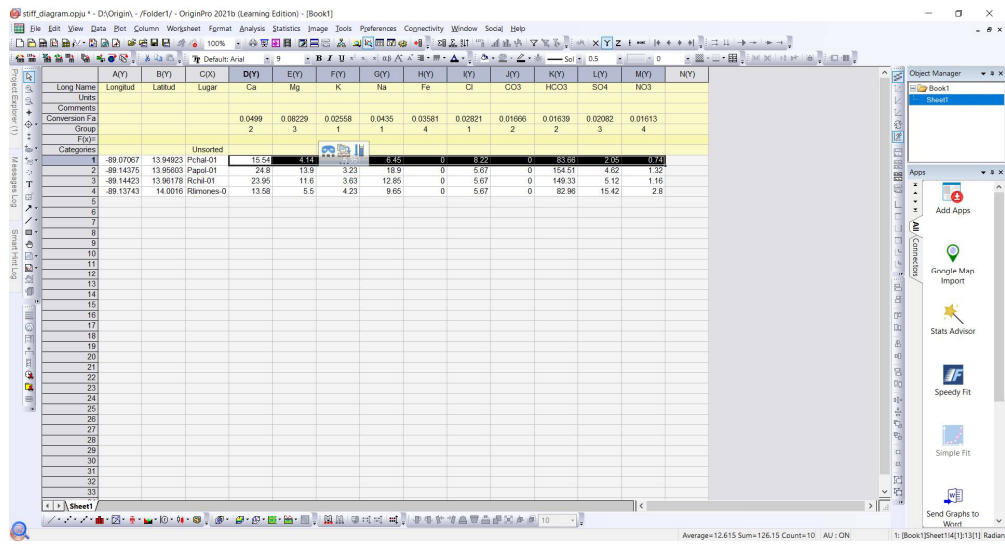


Figura 3.12. Selección de datos a graficar en diagramas de Stiff (véase OriginLab Corporation (2021))

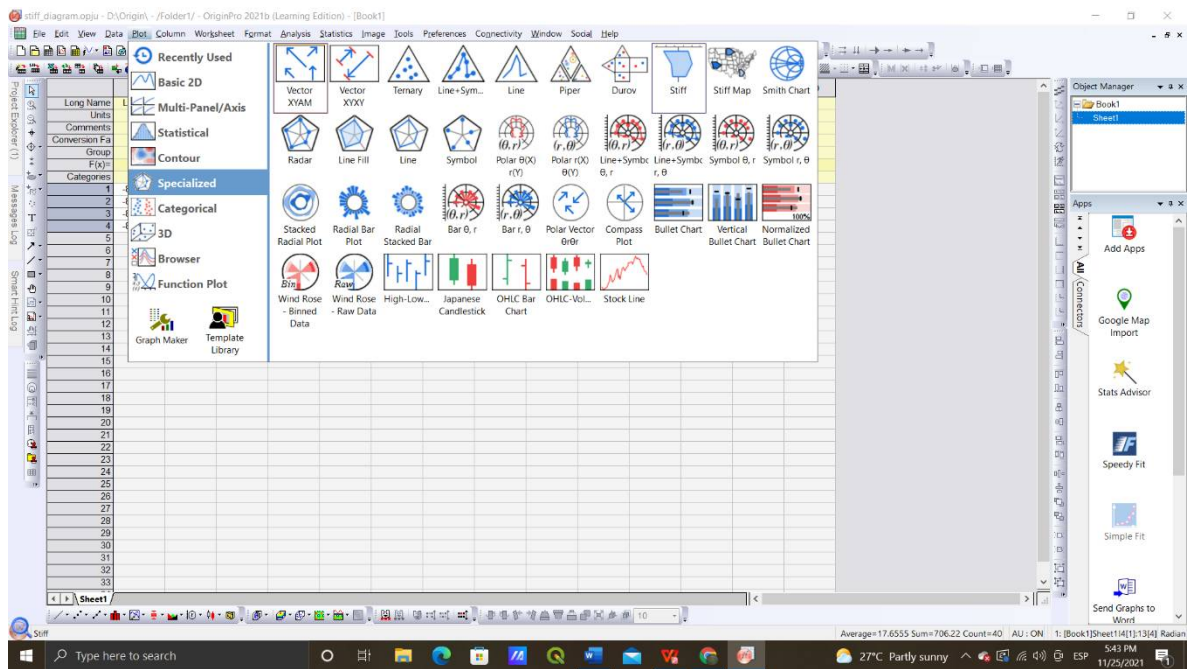
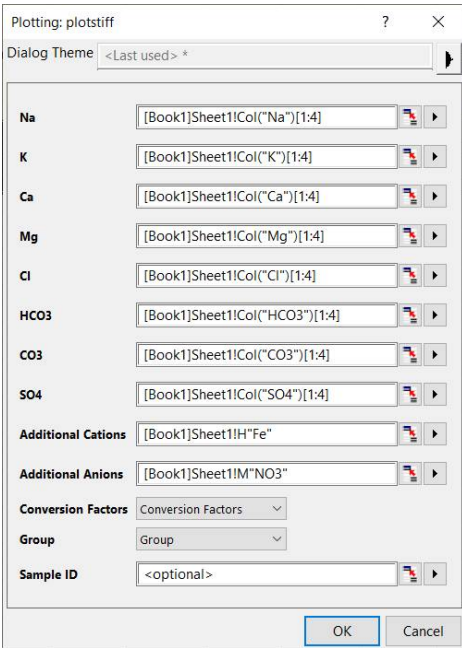


Figura 3.13. Selección del tipo de gráfico a plotear (véase OriginLab Corporation (2021))



El programa escoge automáticamente las columnas a graficar según el ion especificado en el encabezado (véase Figura 3.14). Lo único que debemos agregar es el catión adicional: Fe y el anión adicional: NO₃. Además debemos especificar los factores de conversión y los grupos a formar para el graficado. El diagrama de Stiff que se obtiene se muestra en la Figura 3.15

Figura 3.14. Tabla que sirve para la identificación de iones a graficar en diagrama de Stiff

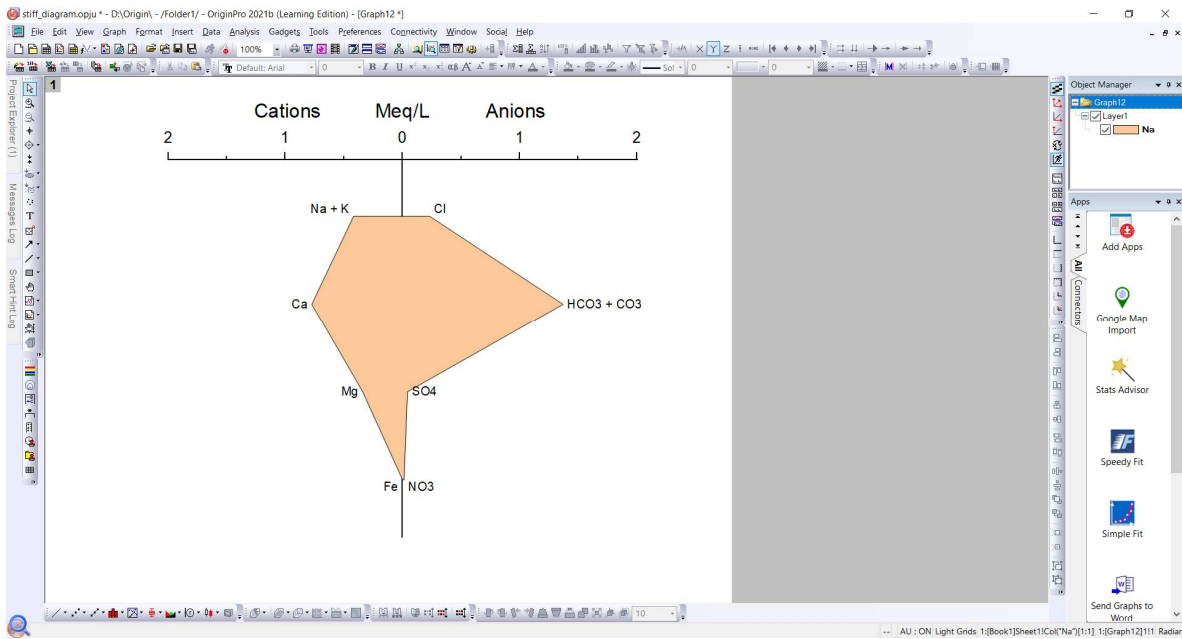


Figura 3.15. Diagrama de Stiff obtenido.
(véase OriginLab Corporation (2021))

3.3.3 Mapa de isolíneas

Finalmente, en la elaboración de los mapas de isolíneas se utilizó SAGA GIS, programa que viene incorporado en la instalación de QGIS. El procedimiento que se describe a continuación se basó en el manual de M. A. Hernández (2019). Luego de abrir SAGA GIS, se buscó en Data Source el archivo shape que contiene los datos a interpolar. Se hizo doble click en el archivo shape; a continuación este archivo apareció cargado en “Data”, tal y como se muestra en la Figura 3.16. Luego se hizo click en el menú Geoprocessing y se eligió lo siguiente: Grid -> Gridding -> Spline Interpolation -> Multilevel B-Spline Interpolation tal y como aparece en la Figura 3.17. En el cuadro de diálogo que apareció, se cambiaron las siguientes opciones: Points, Attributes, Cellsize, Right, Left, Bottom, Top, tal y como se muestra en la Figura 3.18. La opción Points permite elegir el archivo shape para realizar la interpolación. Attributes permite establecer la columna a utilizar del archivo shape anteriormente mencionado. Cellsize establece el tamaño de celda del mapa interpolado; se recomienda se elija un valor pequeño para evitar que el mapa se vea pixelado. Finalmente, las opciones Right, Left, Bottom, Top permiten elegir el tamaño del mapa interpolado según el sistema de coordenadas utilizado en el archivo shape. El resultado se muestra en la Figura 3.19. En la Figura 3.20 se muestra cómo se generaron las isolíneas: en el menú Geoprocessing se eligió Shapes-> Grid ->Vectorization-> Contour Lines from Grid. En la Figura 3.21, se presenta el cuadro de opciones para la generación de isolíneas; aquí se cambiaron las siguientes opciones: Grid System, Grid y Contour. La primera opción se refiere al sistema de grilla creado con la interpolación. La segunda opción se refiere al mapa de interpolación a utilizar. En Contour se eligió <create>. El resultado se muestra en la Figura 3.22. Posteriormente a esto, se preparó el diseño del mapa; esto incluyó cortar el mapa interpolado y las isolíneas para que coincidan con la cuenca bajo estudio; colocar mapa de ubicación, la barra de escala, el norte, la leyenda y la barra de colores del mapa interpolado. Todo esto se realizó en los programas GIS, QGIS y ArcGIS Desktop.

Un aspecto importante que mencionar es que los valores obtenidos en los diagramas de isolíneas se compararán con los valores máximos dados en el reglamento técnico salvadoreño 13.02.01:14⁴: Agua. Agua de consumo humano. Requisitos de calidad e inocuidad.

⁴ El rango de validez de pH para agua de consumo humano varía entre 6.0 a 8.5

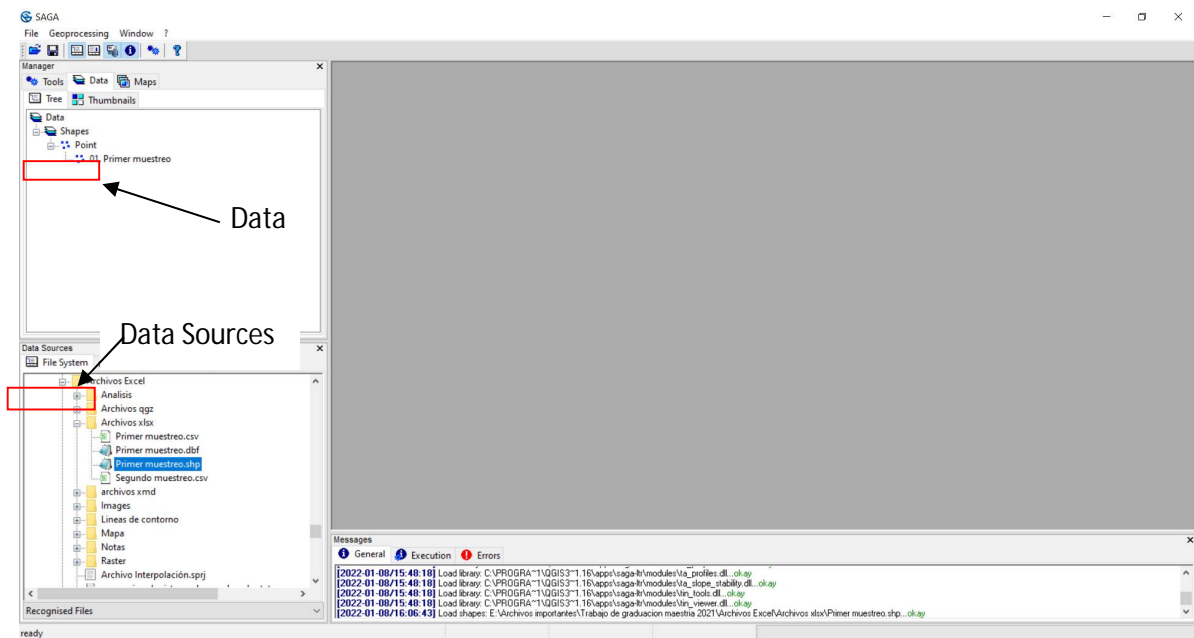


Figura 3.16. Pantalla de inicio de SAGA GIS

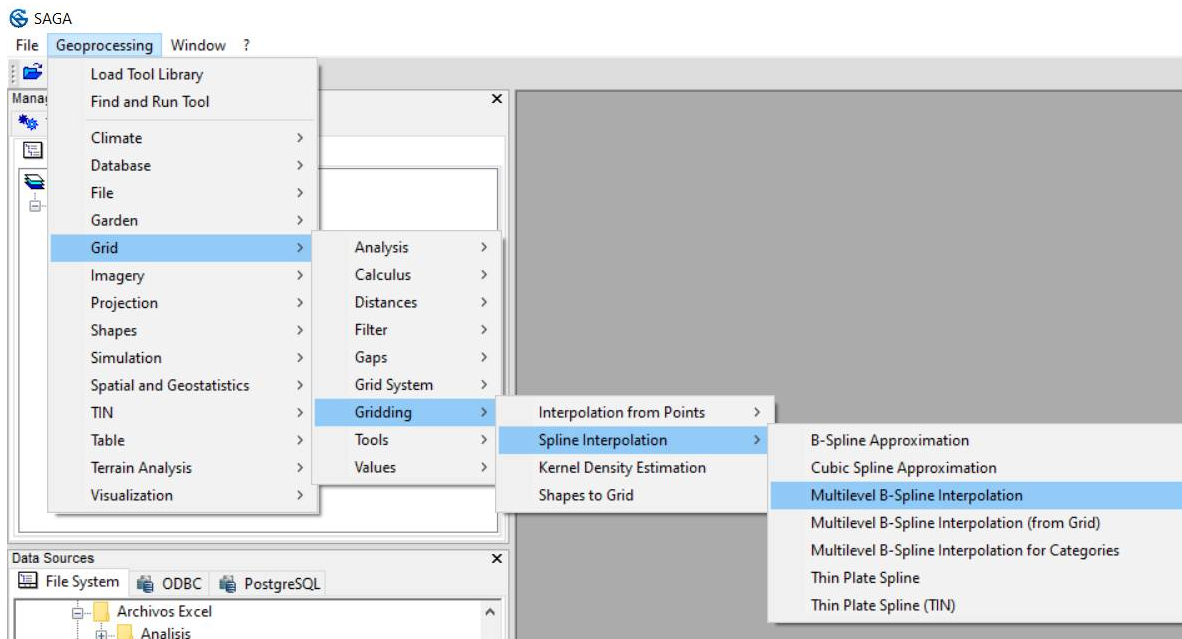


Figura 3.17. Ubicación de la opción de interpolación mediante B-spline multinivel

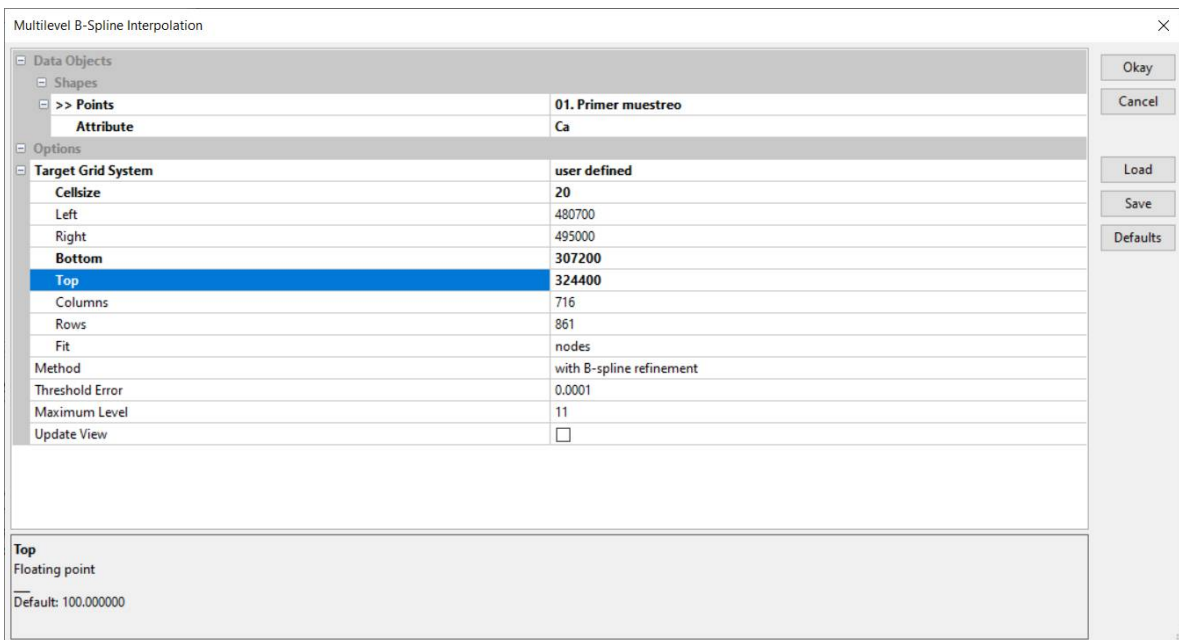


Figura 3.18. Cuadro de opciones de la interpolación B-Spline multinivel

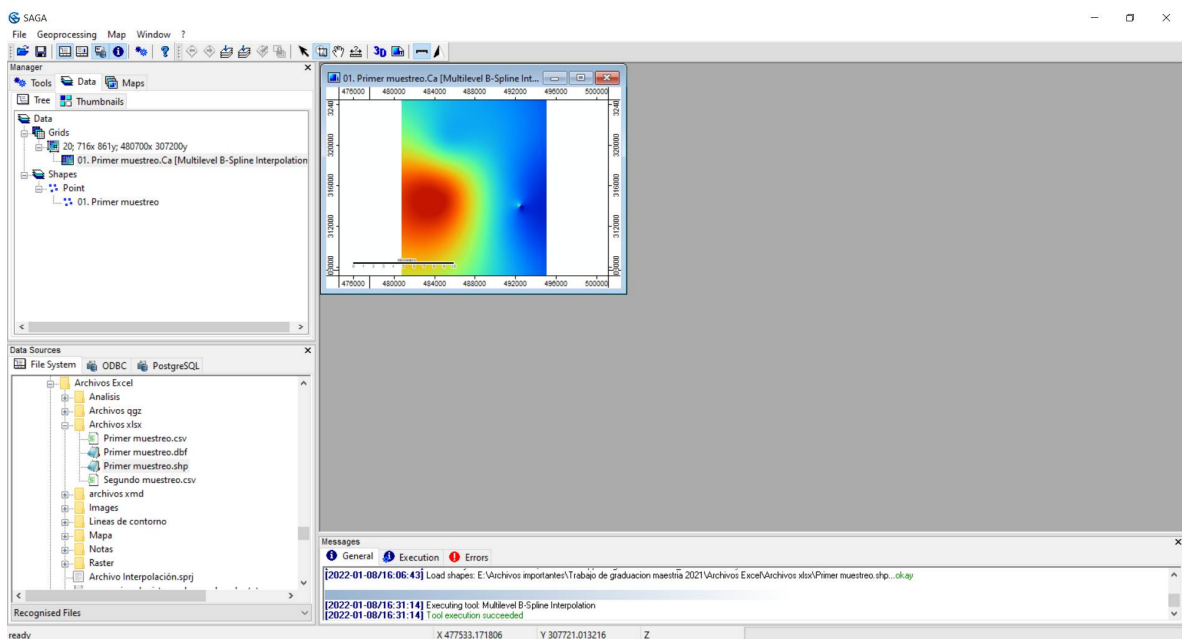


Figura 3.19. Mapa interpolado generado

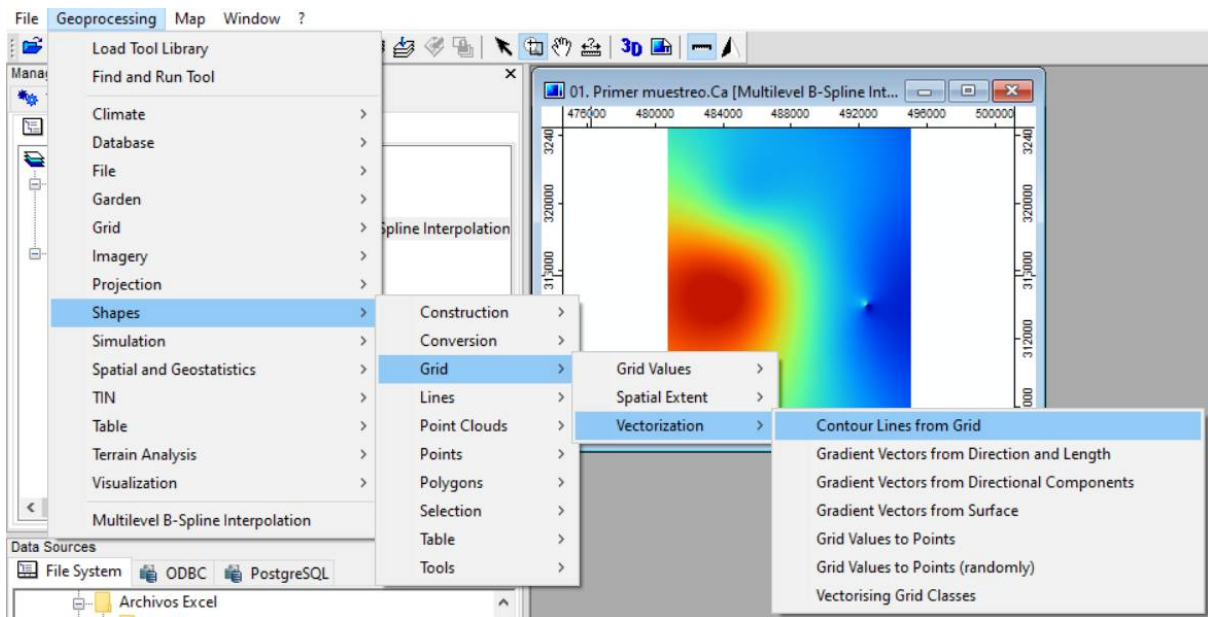


Figura 3.20. Ubicación de la opción para generar las líneas de contorno o isóneas

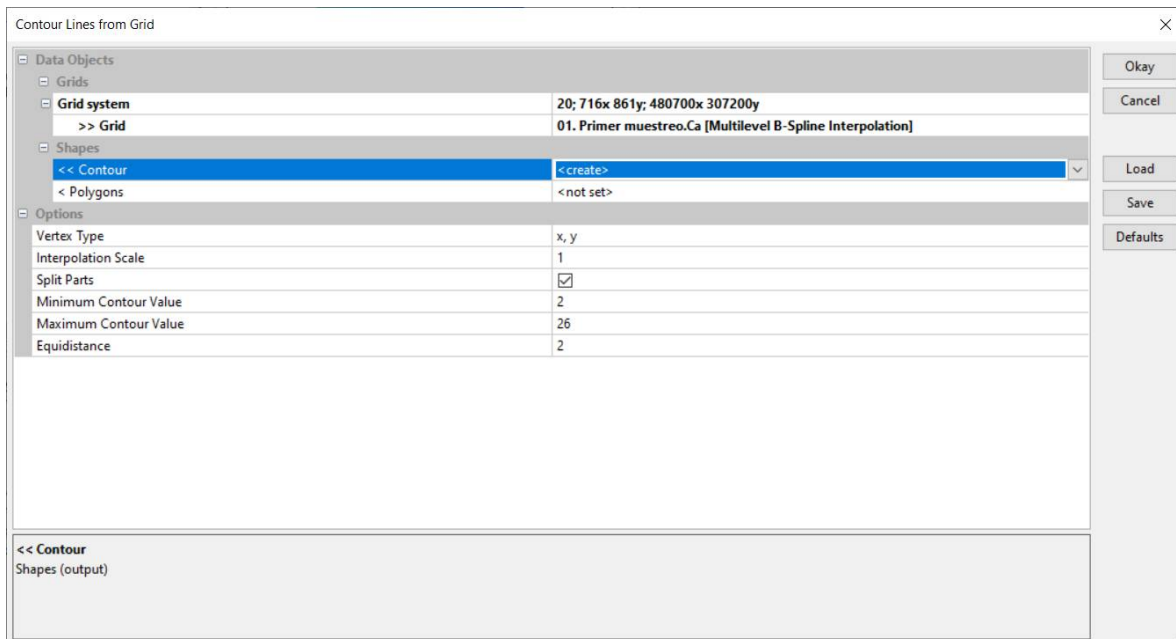


Figura 3.21. Cuadro de opciones para la generación de isóneas.

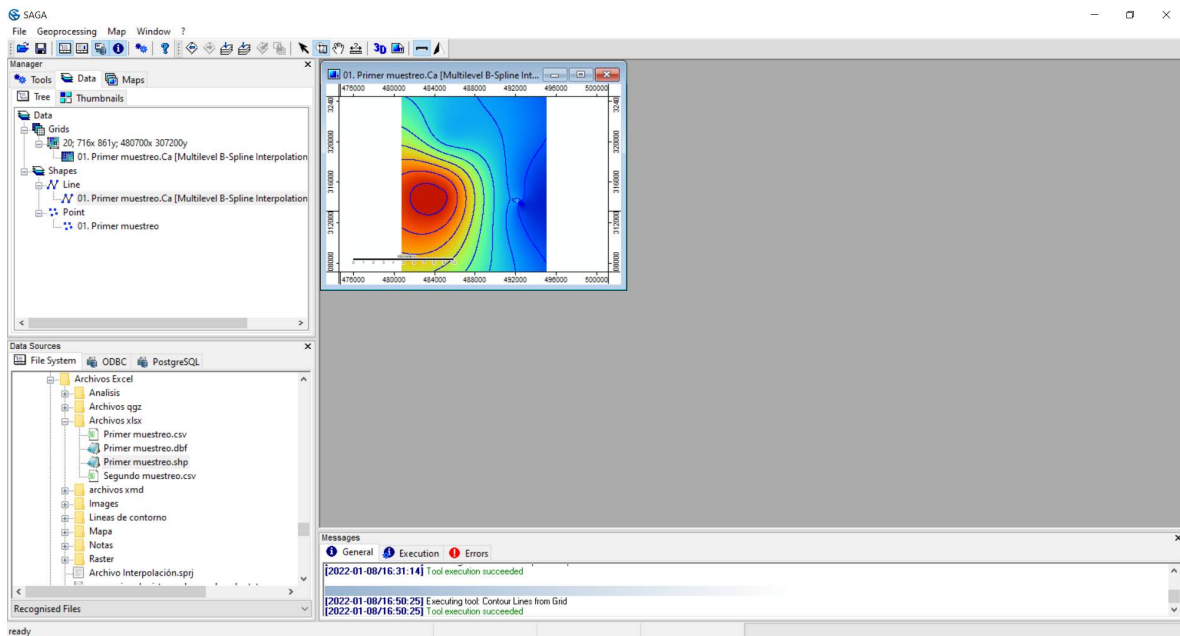


Figura 3.22. Mapa de interpolación generado más isolíneas

3.3.4 Diagramas de Boxplot (de caja y bigotes)

Para la elaboración de estos diagramas, se evaluaron dos opciones: Microsoft Excel y Jupyter Lab. Se notó que al elaborar los boxplot con la primera opción los valores de los cuartiles eran erróneos; así que se decidió ocupar Jupyter Lab. En Jupyter Lab se ocuparon principalmente las siguientes librerías:

- Pandas
- Matplotlib
- Seaborn
- Os

En jupyter lab se ocuparon las siguientes abreviaturas para las librerías: pd para Pandas, pyplot para Matplotlib, sns para Seaborn y os para la última librería.

Primero se ocupó la función `os.getcwd` para recuperar el directorio de trabajo del notebook de jupyter lab. Luego se cambió la carpeta de trabajo al directorio donde se alojaba el archivo de datos de la época lluviosa mediante la función `os.chdir`. Entonces se leyeron los archivos de datos para la época lluviosa mediante la función `pd.read_csv`. Para la época seca, se siguió el mismo procedimiento para los datos de la época seca.

Los datos de la época lluviosa y seca se unieron en una sola tabla mediante la función `pd.concat`. Finalmente se utilizaron las funciones `sns.boxplot`, `plt.ylabel` y `plt.savefig` para elaborar y guardar el diagrama de `boxplot`.

3.3.5 Diagramas de probabilidad normal

En la elaboración de los diagramas de probabilidad normal se realizó lo siguiente:

- Paso 1: Se dispusieron de menor a mayor los valores a utilizar, por ejemplo, temperatura, potencial óxido reducción y concentración de nitratos.
- Paso 2: A cada uno de los valores se les asignó un número correlativo u operador comenzando con el número 1 para el valor mínimo y terminando con el n-ésimo valor para el valor máximo.
- Paso 3: Se calculó la frecuencia relativa de los valores obtenidos en el paso 2 mediante la siguiente fórmula: $(\text{operador} - 0.4) / (\text{número de datos} + 0.2)$
- Paso 4: Se calculó el valor Z para la serie de datos.
- Paso 5: Utilizando la función `INV.NORM.ESTAND` para obtener números inversos de la distribución normal estándar acumulativa, esta distribución tiene una media de cero y una desviación estándar de uno.
- Paso 6: Los valores de Z calculados en el paso 4 y los valores inversos obtenidos en el paso 5 se graficaron. Si estos valores siguen un comportamiento lineal, que para este trabajo significó tener un R^2 mayor o igual a 0.9, entonces puede concluirse que se trata de una distribución normal.

3.4 Resumen del capítulo

En este capítulo se han descrito la metodología utilizada para la realización de las distintas actividades de este trabajo de investigación. Estas actividades se dividieron en trabajo de gabinete, trabajo de campo y análisis e interpretación de resultados. En el trabajo de gabinete se realizaron actividades que permitieron preparar el camino para las actividades de campo. En este punto, fue importante comunicarse con el personal a cargo de los sistemas de agua para arreglar día y hora de reunión, así como para consultar la dirección de las juntas de agua. Los contactos se realizaron mediante la alcaldía de Suchitoto y el Foro del Agua. Como actividades de campo se realizó el muestreo de las aguas de la microcuenca del río Los Limones en cinco puntos a lo largo de la cuenca. Finalmente, como análisis

e interpretación de resultados se describieron los pasos para generar los diagramas de Stiff, Piper, el mapa de isolíneas, diagramas de boxplot y diagramas de probabilidad normal.

En el siguiente capítulo se hará la discusión de los resultados, enfocándose sobre todo en las variables hidrogeoquímicas establecidas en el capítulo 2.

Se realizó el análisis de resultados utilizando valores de tendencia central como la media y la mediana para las series de datos obtenidas. Se analizó si dichas series contienen datos atípicos y se determinó si la mediana estaba desplazada o no hacia el cuartil I o III de las series utilizando para ello diagramas de cajas y bigotes (boxplot). Además, se especificó si las series de datos tienen un comportamiento normal haciendo uso de gráficos de probabilidad normal y los coeficientes estandarizados de asimetría y de curtosis.

4.1 Primer muestreo (estación lluviosa) y segundo muestreo (estación seca)

Para el primer muestreo se presentan los datos de la Tabla 4.1 y Tabla 4.2, mientras que para el muestreo de la época seca se muestran los datos de la Tabla 4.3 y Tabla 4.4. Además, en el Mapa 4.1 se muestra la ubicación de los puntos de muestreo en la época lluviosa y época seca, respectivamente.

4.1.1 Temperatura

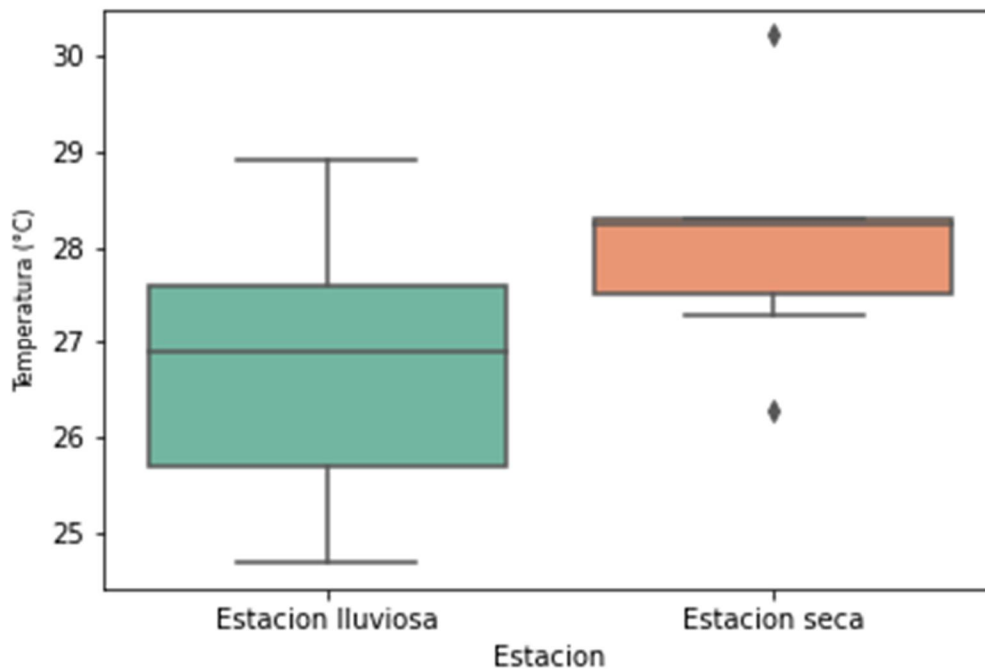


Figura 4.1. Diagrama de boxplot de la temperatura (°C)

Para la estación lluviosa, se observa en el diagrama de boxplot de temperatura que no hay datos atípicos. Además, la mediana (26.9°C) se encuentra más cerca del cuartil III (27.6°C). Sin embargo,

tanto el coeficiente de asimetría estandarizado (0.09838) como el de curtosis estandarizado están en el rango esperado para una distribución normal. El diagrama de probabilidad normal confirma la normalidad de los datos. Para la estación seca, se observan dos datos atípicos, la mediana (28.25°C) está desplazada hacia el tercer cuartil (28.3°C). Aun así, el coeficiente de asimetría estandarizado (0.4057) y el de curtosis estandarizado (0.6577) revelan que se trata de una distribución normal (véase Figura 4.2.)

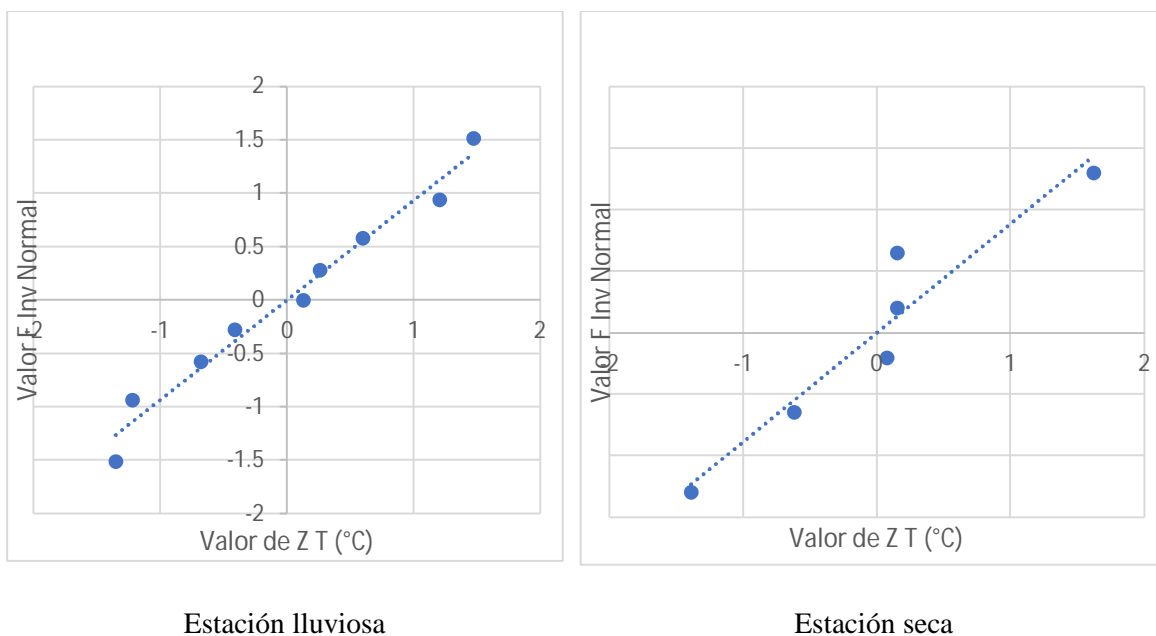


Figura 4.2. Gráfico de probabilidad normal de la temperatura

Puede observarse en la Figura 4.3 el valor de temperatura en RCHAL-01 se convierte en un mínimo relativo en la estación lluviosa y un mínimo absoluto en la estación seca. MSANTO tiene la temperatura mínima en la estación lluviosa; para la estación seca este punto ya no aparece porque durante dicha época no se midió parámetros de campo en dicho sitio. MBORBO-01 es un máximo relativo en la estación lluviosa, mientras que, en la época seca, se trata de un máximo absoluto.

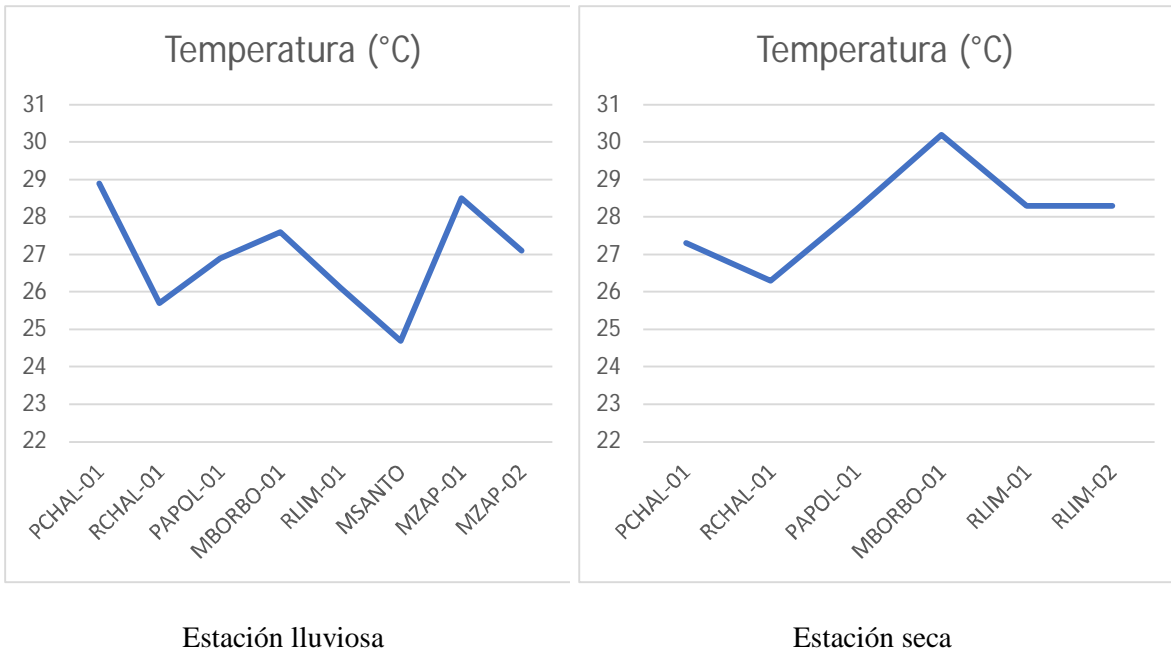


Figura 4.3. Gráfico de líneas de temperatura (°C)

Tabla 4.1. Parámetros de campo, época lluviosa (Junio, 2021)

Punto	Tipo	Coordenada W	Coordenada N	Elevación (msnm)	T (°C)	P (mb)	DO (%)	DO (mg/l)	Cond. Eléctrica μS/cm)	TDS (mg/l)	pH	ORP (mV)
MBORBO-01	Manantial	484423.649	315446.284	270	27.6	981	53.3	3.94	257	167	8.56	164.6
MSANTO ^{††}	Manantial	491464.25	310921.897	621	24.7	946	93.7	7.36	153	100	8.69	86.1
MZAP-01 ⁴	Manantial	491384.033	313423.41	432	28.5	967	80.9	6.1	217	143	7.87	114.5
MZAP-02 ⁴	Manantial	491696.988	313679.664	411	27.1	967	85.2	6.49	209	135	7.89	98.8
PAPOL-01	Pozo	484475.49	314810.124	295.35	26.9	980	89.7	6.86	284	186	8.56	164.2
PCHAL-01	Pozo	492371.7	314054.312	393	28.9	971	94.8	6.87	149	96	9.5	145.3
RCHAL-01	Río	492418.493	313952.887	375	25.7	972	83.5	6.57	70	46	9.22	109.27
RLIM-01	Río	485160.868	319850.834	263	26.1	980	76.3	5.99	91	57	8.41	117.7

^{††} Para estos tres lugares se midieron únicamente los parámetros de campo de temperatura, presión, elevación, DO%, DO (mg/l), conductividad eléctrica, TDS, pH, ORP.

Tabla 4.2. Concentración de compuestos mayoritarios (mg/l), época lluviosa (Junio, 2021)

Punto	Coordenadas W	Coordenadas N	Ca	Mg	K	Na	Fe	Cl	CO ₃	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	PO ₄	E.B. ⁶ .
PCHAL-01	492371.7	314054.312	15.54	4.14	5.35	6.45	0	8.22	0	83.66	2.05	0.74	0.49	-4.35%
RCHAL-01	492418.493	313952.887	4.65	1.19	3.03	3.53	0.29	12.34	0	0 ⁷	8.39	82.81	0.15	-53.71%
PAPOL-01	484475.49	314810.124	24.8	13.9	3.23	18.9	0	5.67	0	154.51	4.62	1.32	0.44	7.57%
MBORBO- 01	484423.649	315446.284	23.95	11.6	3.63	12.85	0	5.67	0	149.33	5.12	1.16	0.51	0.95%
RLIM-01	485160.868	319850.834	13.58	5.5	4.23	9.65	0	5.67	0	82.96	15.42	2.8	0.45	-6.80

⁶ E.B. significa balance eléctrico

⁷ Este valor de 0 para los carbonatos/bicarbonatos es sospechoso puesto que la conductividad eléctrica para ese punto fue de 70 μ S/cm. Pudo haber ocurrido un error de muestreo o de laboratorio para este sitio de muestreo.

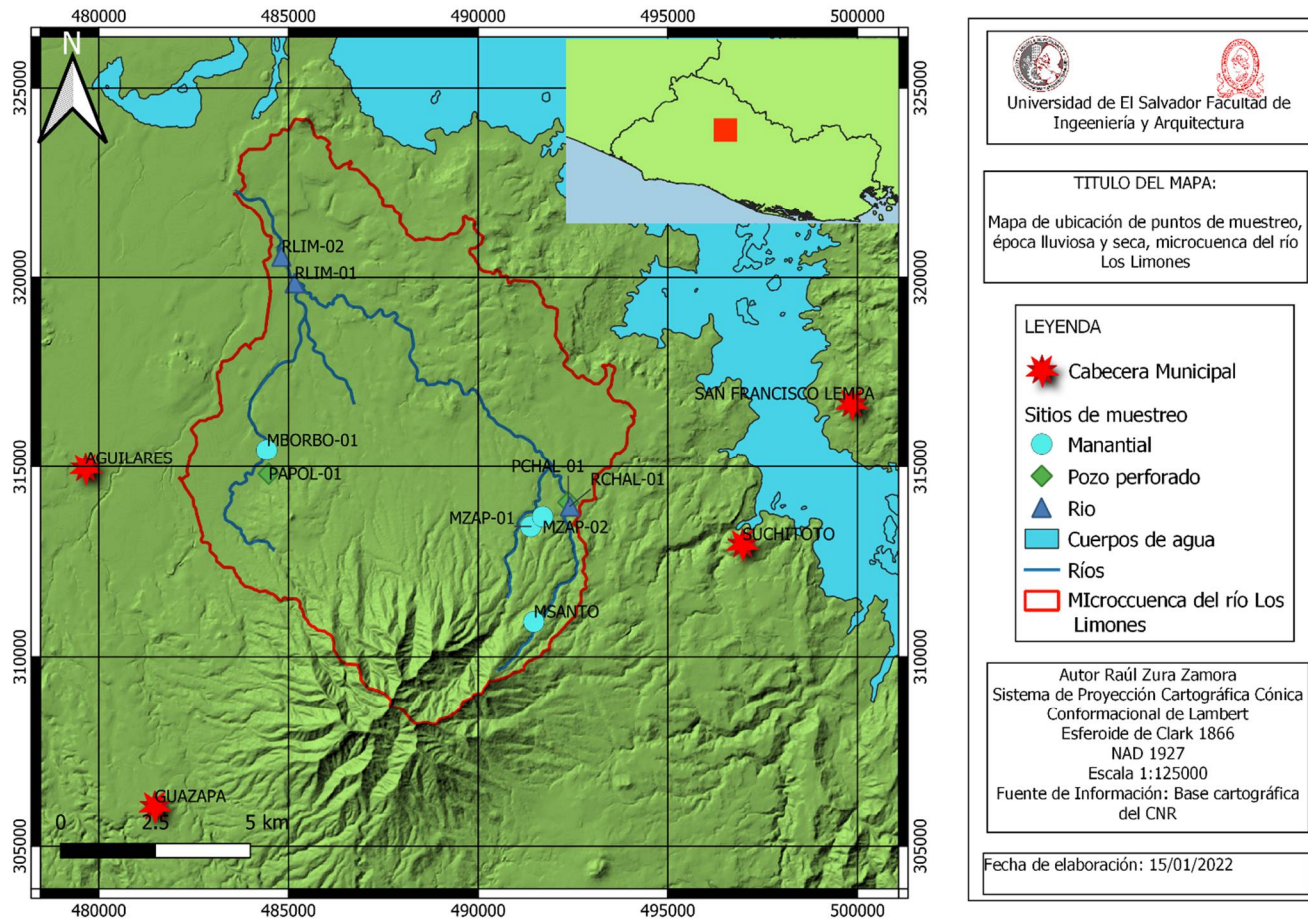
Tabla 4.3. Parámetros de campo, época seca (Febrero, 2022)

Punto	Tipo	Coordenada W	Coordenada N	Elevación (msnm)	T (°C)	P (mbar)	DO %	DO (mg/l)	Cond. eléctrica (μS/cm)	TDS (mg/L)	pH	ORP (mV)
MBORBO-01	Manantial	484429.408	315440.749	270	30.2	984	70.4	5.12	216	142	7.35	155.2
PAPOL-01	Pozo	484477.289	314806.435	295.4	28.2	981	93.2	6.64	232	152	7.08	130
PCHAL-01	Pozo	492371.677	313973.183	393	27.3	973	99.5	7.22	192	125	6.7	104.2
RCHAL-01 ⁸	Río	492425.688	313925.227	375	26.3	973	88.3	7.12	90	63	6.9	144.2
RLIM-01	Río	485174.916	319858.202	263	28.3	984	92.3	7.1	209	137	6.92	136
RLIM-02	Río	484795.429	320549.133	276	28.3	984	101.8	7.84	208	133	6.94	129

⁸ Para este punto únicamente se tomaron los parámetros de campo de temperatura, presión, DO%, DO (mg/l), conductividad eléctrica, TDS, pH y ORP.

Tabla 4.4. Concentración de compuestos mayoritarios (mg/l), época seca (Febrero, 2022)

Punto	Coordenadas W	Coordenadas N	Ca	Mg	K	Na	Fe	Cl	CO ₃	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	PO ₄	E.B.
PCHAL-01	492366.274	313973.184	15.74	8.93	10.95	9.75	0	6.99	0	87.43	5.5	0	0.42	%11.72
PAPOL-01	484472.252	314816.027	22.33	11.55	7.3	5.2	0	8.74	0	100.23	5.39	1	0.34	%9.97
MBORBO-	484427.864	315267.797	20.08	12.25	13.25	9.13	0	6.99	0	104.5	9.21	1.11	0.39	%12.59
RLIM-01	485175.257	319825.933	18.34	8.93	9.35	6.9	0	5.24	0	93.83	10.47	1	0.46	%6.18
RLIM-02	484811.994	320552.995	17.5	9.1	10.35	6.75	0	6.99	0	87.43	9.81	0.88	0.5	%7.81



Mapa 4.1. Mapa de ubicación de puntos de muestreo.

4.1.2 DO (%)

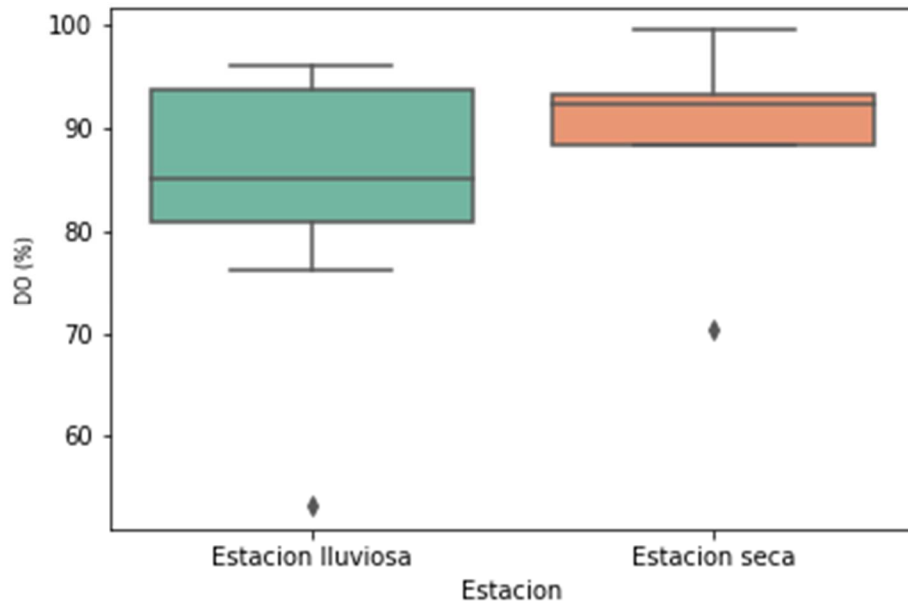
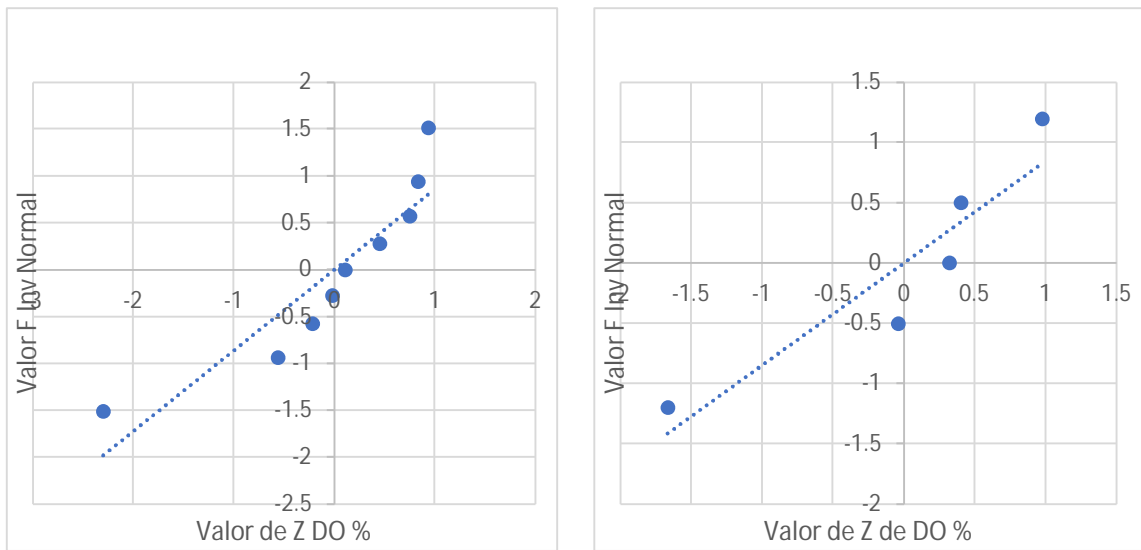


Figura 4.4 Diagrama de boxplot de DO %

Puede observarse para la estación lluviosa, que en el boxplot del DO% de la Figura 4.4 hay un dato atípico (53.3%) que está afectando a la media. La media (83.72%) está desplazada con respecto a la mediana (85.2%). Además, la mediana se encuentra relativamente más cerca del cuartil I (80.9%) que del cuartil III (93.7%). Se trata de una serie con una distribución diferente a la normal. Sus coeficientes de asimetría estandarizado (-2.0464) y de curtosis estandarizado (2.0567) que caen fuera del rango esperado para una distribución normal (-2 a 2) y el diagrama de probabilidad normal confirman la no normalidad de los datos.

Con respecto a la estación seca, se observa un dato atípico (70.4%), el cual está afectando al valor de la media (88.74%). La media está desplazada con respecto a la mediana (92.3%). La mediana se encuentra más cerca del cuartil III (93.2%). Los coeficientes de asimetría estandarizado (-1.3649) y curtosis estandarizada (1.2831) reflejan que se trata de una distribución normal, si bien el diagrama de probabilidad normal no da evidencia de la normalidad de los datos (véase Figura 4.5)



Estación lluviosa

Estación seca

Figura 4.5. Gráfico de probabilidad normal de DO %

Puede observarse en la Figura 4.6, que el valor de DO (%) de MBORBO-01 se convierte en un mínimo tanto en época lluviosa como seca. Si bien dicho valor es menor en la estación lluviosa (53%). Los sitios con mayor DO (%) es PCHAL-01 en la estación lluviosa y RLIM-02 en la estación seca.

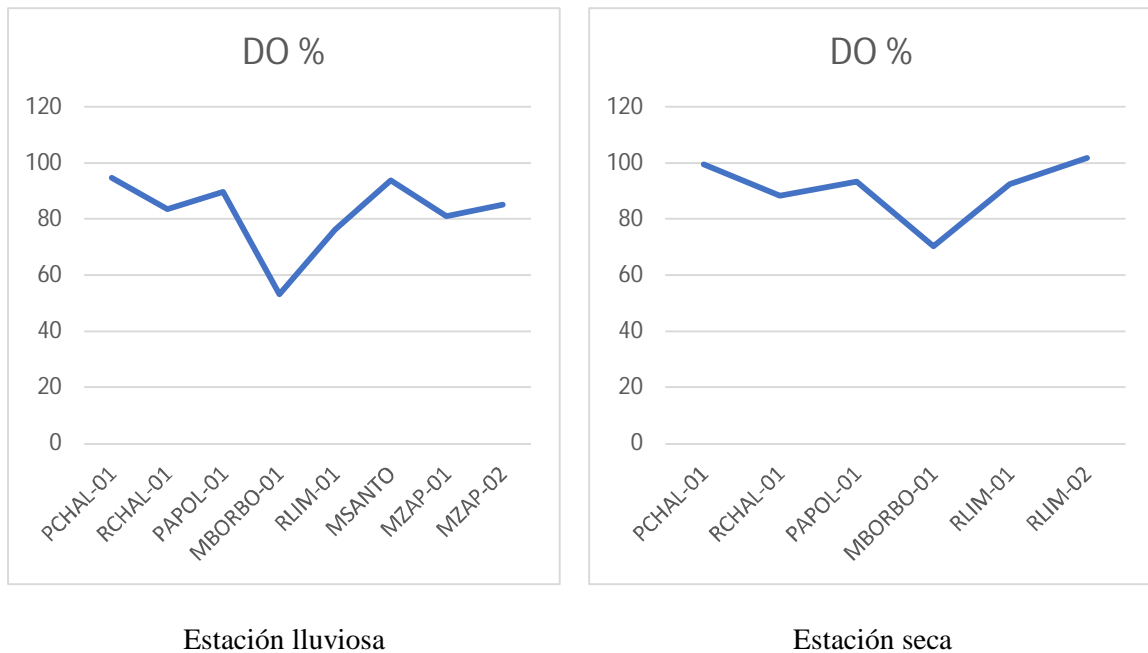


Figura 4.6. Gráfico de líneas de DO (%)

4.1.3 Conductividad eléctrica

Para la estación lluviosa, se observa en el diagrama de boxplot de conductividad eléctrica de la Figura 4.7 de que la media ($172.56 \mu\text{S}/\text{cm}$) está bastante desplazada con respecto a la mediana ($153 \mu\text{S}/\text{cm}$). La mediana se encuentra desplazada hacia el cuartil I ($123 \mu\text{S}/\text{cm}$). La serie no cuenta con datos atípicos. Lo anterior podría hacer pensar que se trata de una distribución diferente a la normal pero sus coeficientes de asimetría estandarizado (0.1768) y de curtosis estandarizado (-0.7270) caen dentro del rango esperado para una distribución normal. Esto se puede comprobar con el diagrama de probabilidad normal, en donde no se evidencia normalidad en los datos.

En el caso de la estación seca, se observa que hay un dato atípico ($90 \mu\text{S}/\text{cm}$) que está afectando al valor de la media ($187.8 \mu\text{S}/\text{cm}$). La mediana ($209 \mu\text{S}/\text{cm}$) está desplazada hacia el cuartil III ($216 \mu\text{S}/\text{cm}$). Los coeficientes de asimetría estandarizado (-1.7207) y de curtosis estandarizado (1.7211) reflejan de que la serie de datos tiene una distribución cercana a la normal, no obstante la gráfica de probabilidad normal en la Figura 4.8 no muestra normalidad en los datos.

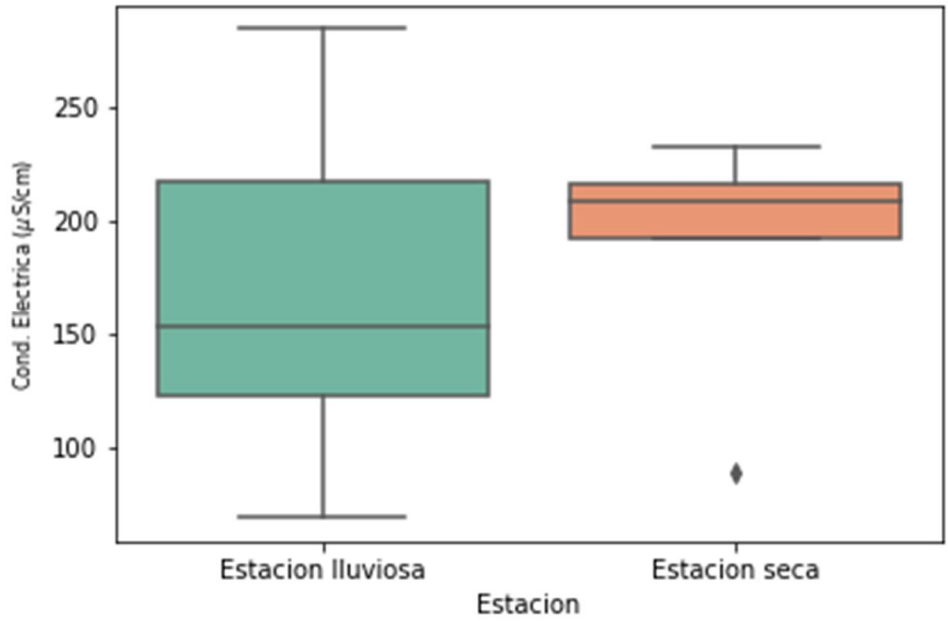


Figura 4.7. Diagrama de boxplot de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

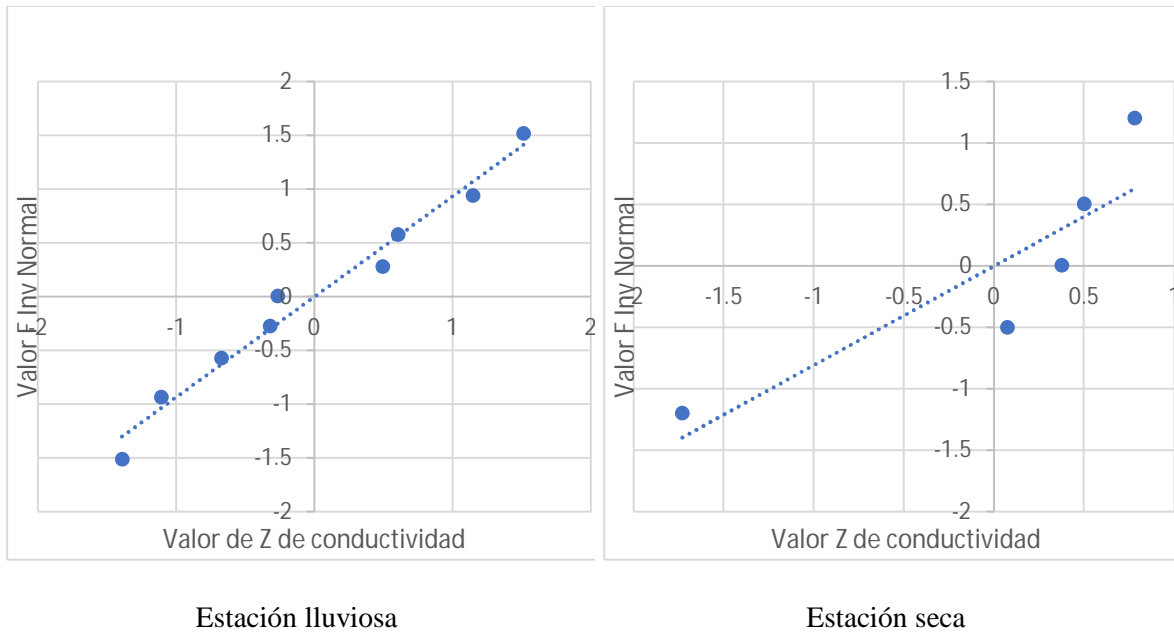


Figura 4.8. Gráfico de probabilidad normal de la conductividad eléctrica

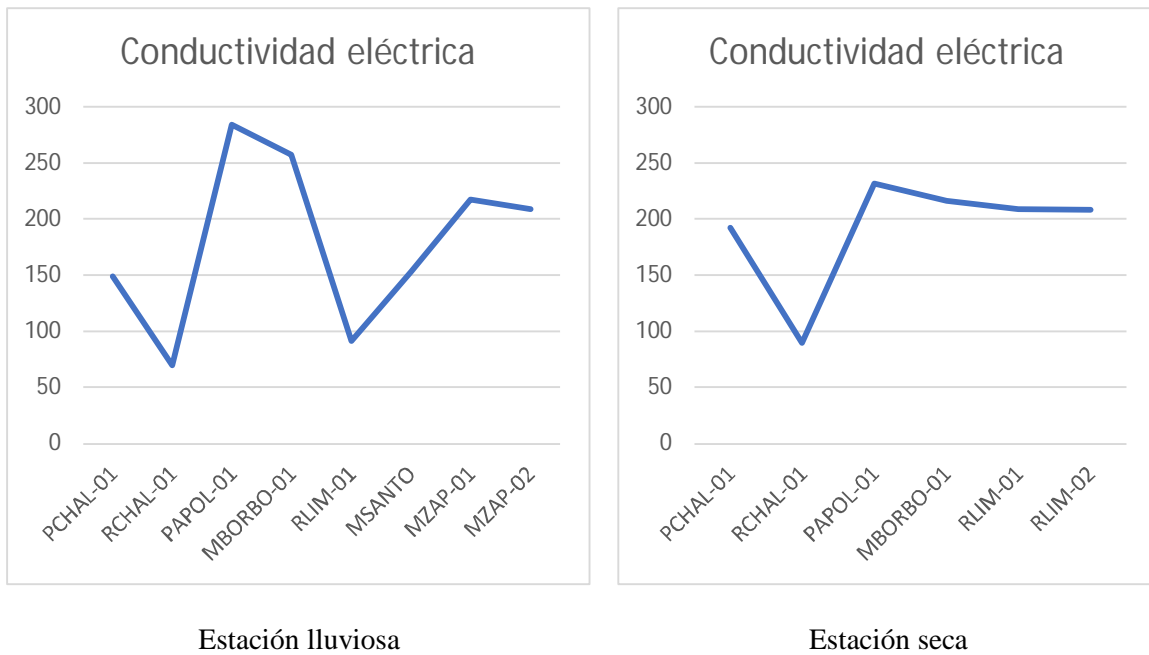


Figura 4.9. Gráfico de líneas de conductividad eléctrica (µS/cm)

Puede observarse en la Figura 4.9 que la conductividad en RCHAL-01 es un mínimo tanto en época lluviosa como seca; mientras que PAPOL-01 es el sitio con mayor conductividad eléctrica en ambas épocas.

4.1.4 Sólidos disueltos totales (TDS)

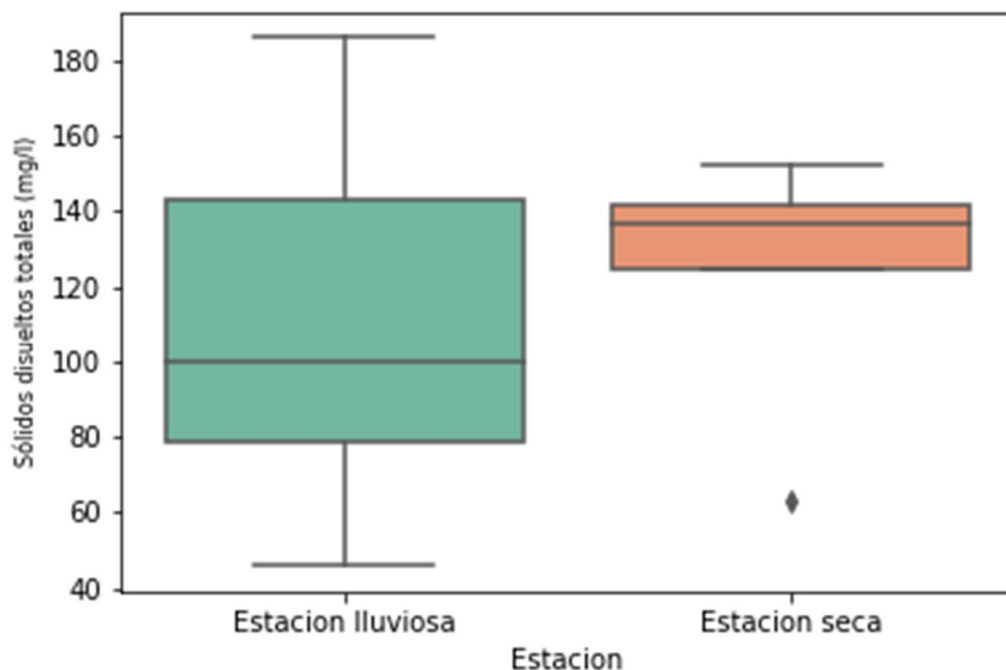


Figura 4.10. Gráfico de boxplot de TDS (mg/l)

En la estación lluviosa, puede observarse en el diagrama de boxplot de TDS de la Figura 4.10 que la serie no tiene datos atípicos. La media (112.11 mg/l) está desplazada con respecto a la mediana (100 mg/l). La mediana se encuentra más cerca del cuartil I (79 mg/l) que del cuartil III (143 mg/l). Los coeficientes de asimetría estandarizado (0.1920) y de curtosis estandarizado (-0.7429) dan a entender que la serie de TDS se encuentra en el rango esperado para una distribución normal, tal y como se evidencia en el gráfico de probabilidad normal. Con respecto a la estación seca, se observa un dato atípico (63 mg/l) que está afectando el valor de la media (123.80 mg/l). Se observa que la mediana (137 mg/l) está desplazada hacia el cuartil III (142 mg/l). Los valores de los coeficientes de asimetría estandarizado (-1.6703) y de curtosis estandarizado (1.6229) se encuentran dentro del rango esperado de -2 a +2 para una distribución normal; si bien el gráfico de probabilidad normal no muestra normalidad en los datos (véase Figura 4.11).

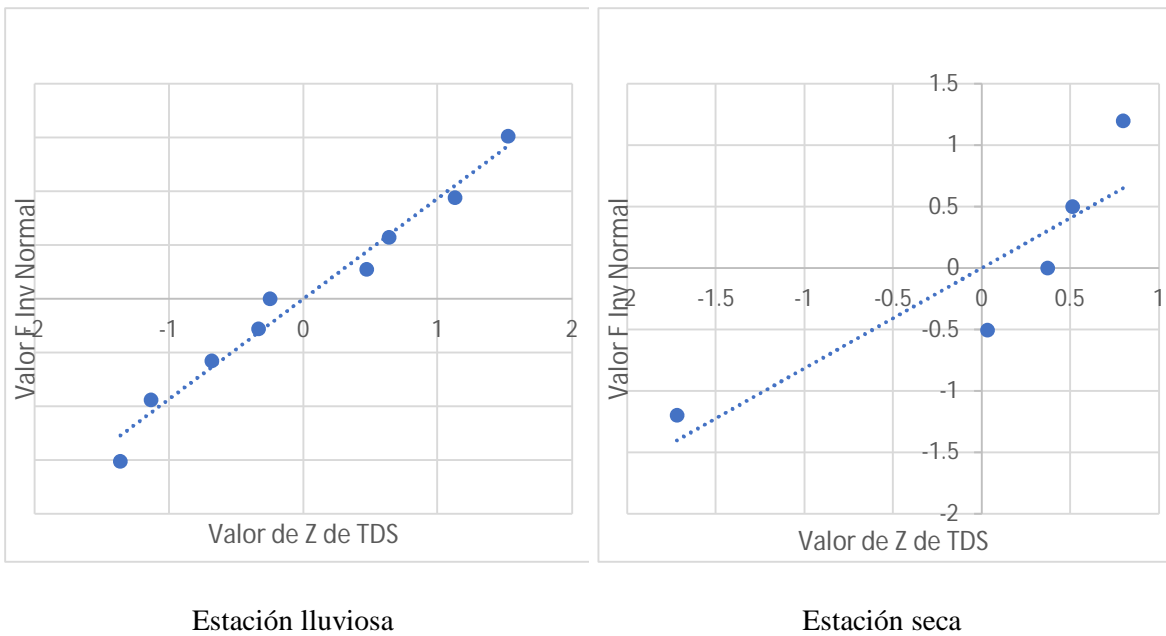


Figura 4.11. Gráfico de probabilidad normal de TDS

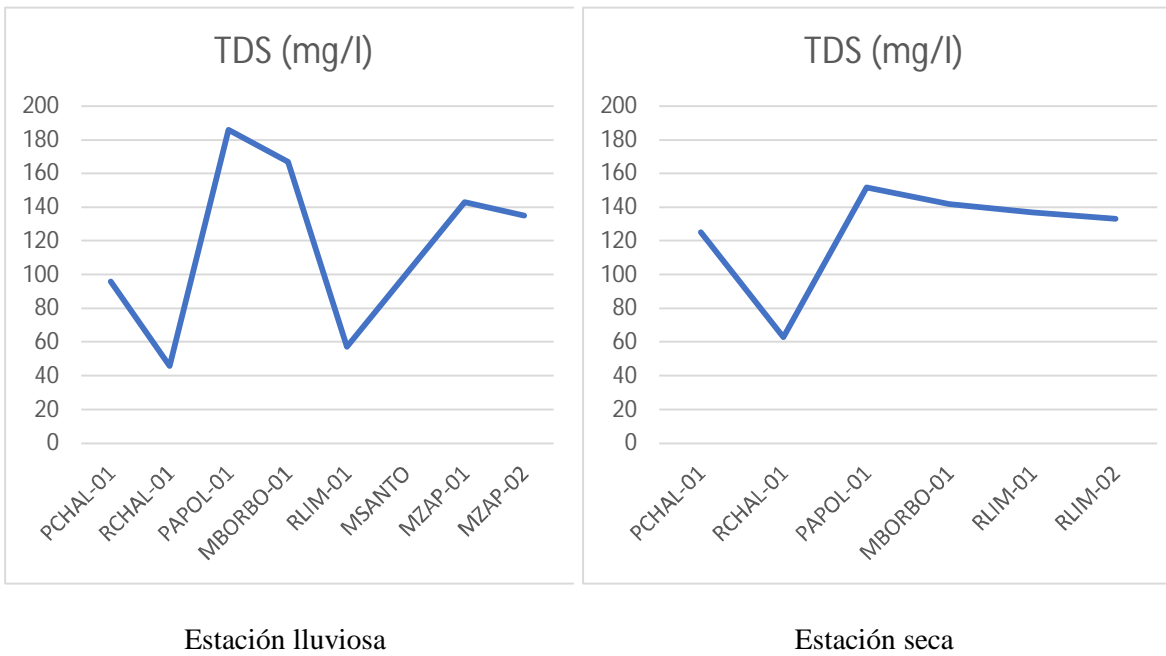


Figura 4.12. Gráfico de línea de TDS (mg/l)

Se observa en la Figura 4.12, que hay dos sitios de muestreo con valores mínimos de TDS, RCHAL-01 y RLIM-01. Para la época seca sólo hay un mínimo en RCHAL-01.

4.1.5 pH

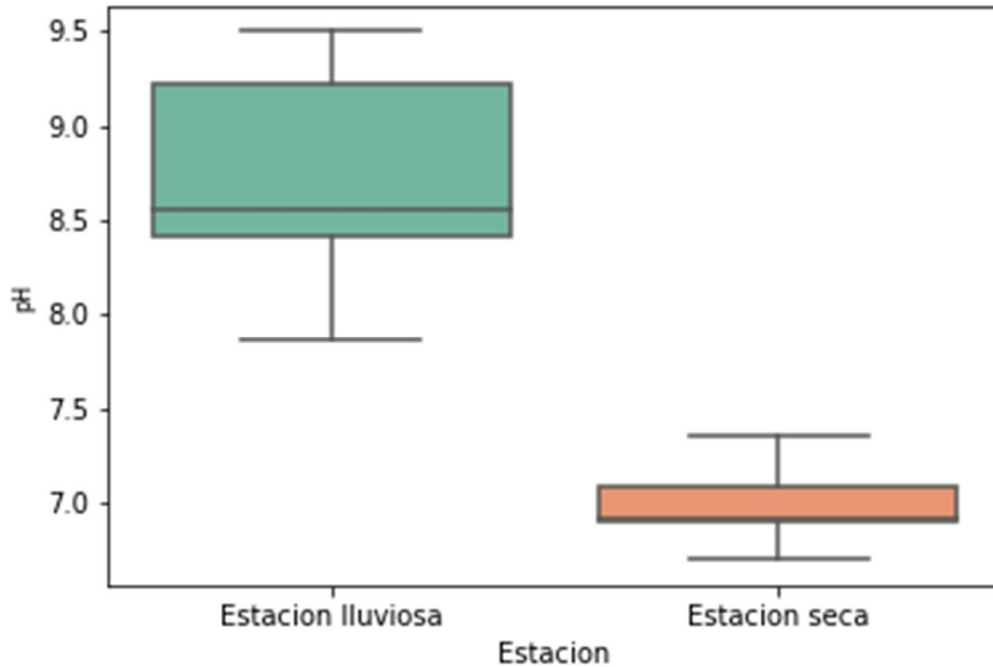
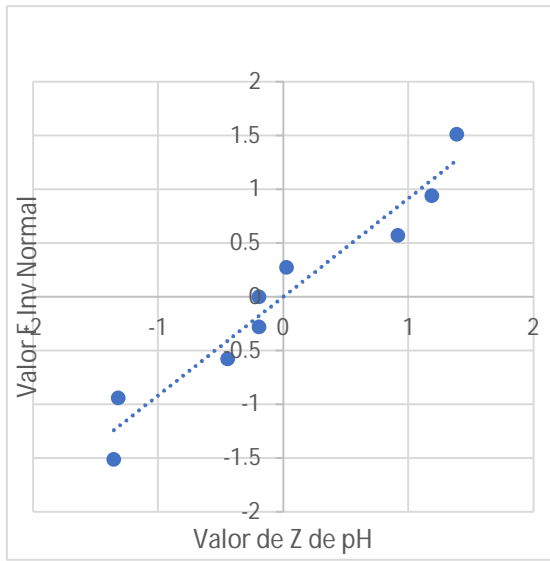
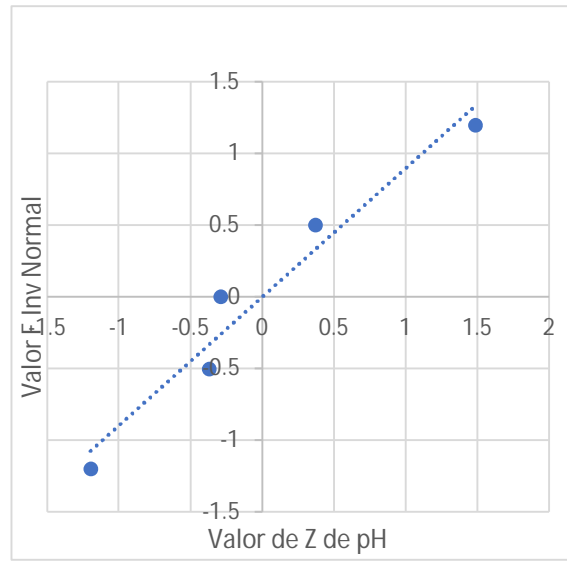


Figura 4.13. Gráfico de boxplot del pH

En la estación lluviosa, no se observan valores atípicos de pH en el boxplot de la Figura 4.13. La media ($\text{pH}=8.68$) se encuentra desplazada con respecto a la mediana ($\text{pH}=8.56$). La mediana está más cerca del primer cuartil ($\text{pH}=8.41$) que del tercer cuartil ($\text{pH}=9.22$). La serie muestra normalidad según el gráfico de probabilidad normal; esto se comprueba con los coeficientes de asimetría estandarizado (0.0392) y de curtosis estandarizado (-0.7064). En la estación seca, la mediana ($\text{pH}=6.92$) se encuentra desplazada hacia el cuartil I ($\text{pH}=6.90$). No hay datos atípicos para esta serie de datos. Los coeficientes estandarizados de asimetría (0.5864) y de curtosis (0.3265) revelan que se trata de una distribución normal y así lo evidencia el gráfico de probabilidad normal en la Figura 4.14.

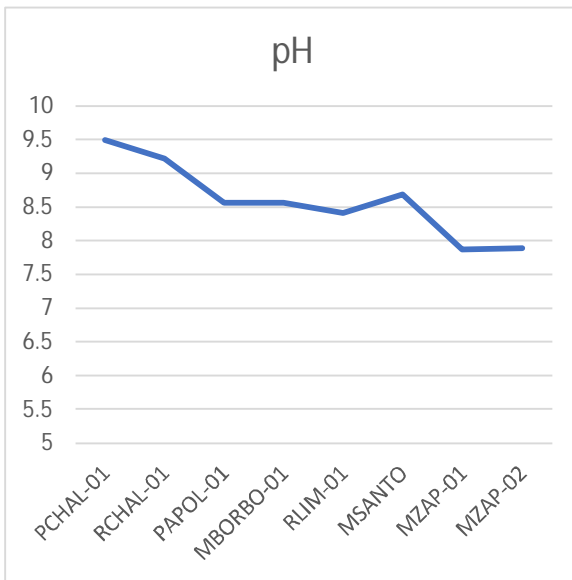


Estación lluviosa

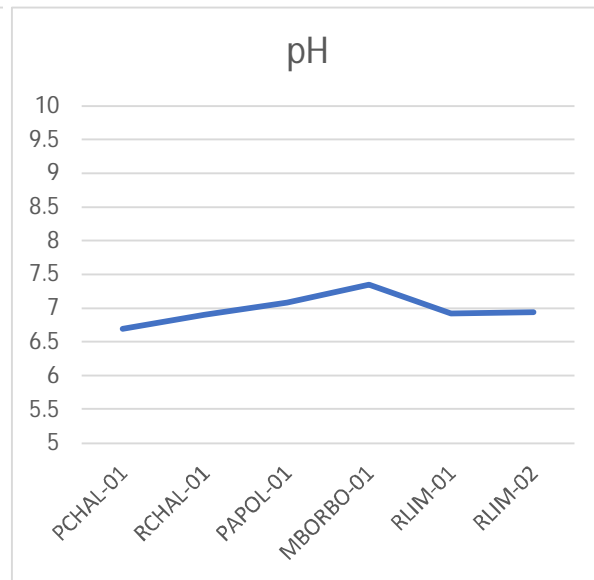


Estación seca

Figura 4.14 Gráfico de probabilidad normal del pH.



Estación lluviosa



Estación seca

Figura 4.15. Gráfico de línea de pH

Como puede observarse en la Figura 4.15, el sitio a mayor pH en la época lluviosa es PCHAL-01, con 9.5; mientras que el valor mínimo de pH le corresponde a MZAP-01 y MZAP-02. En la época seca, el sitio con mayor pH es MBORBO-01 y menor pH corresponde a PCHAL-01.

4.1.6 Potencial redox (ORP)

El gráfico de boxplot de la variable ORP de la Figura 4.16 para la estación lluviosa, muestra que la media (122.4) está desplazada con respecto a la mediana (114.5). Además, la mediana se encuentra más cerca del cuartil I (101.2) que del cuartil III (145.3). La serie no tiene datos atípicos. El gráfico de probabilidad normal de los datos muestra normalidad en los datos, tal y como lo comprueban los coeficientes estandarizados de asimetría (0.7145) y de curtosis (-0.7049).

Para la estación seca, se observa un dato atípico (104.2) que estaría afectando el valor de la media (133.92). La mediana está ligeramente desplazada hacia el cuartil I (130). Los valores de coeficientes estandarizados de asimetría (-0.8485) y curtosis (0.6081) revelan que hay normalidad en los datos, tal como se puede visualizar en la Figura 4.17.

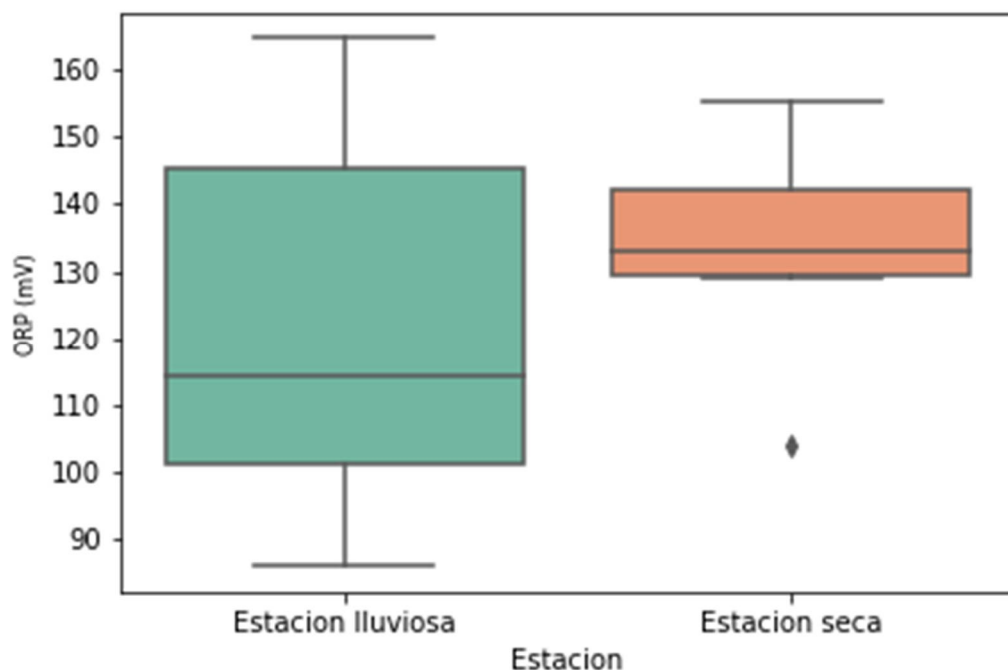
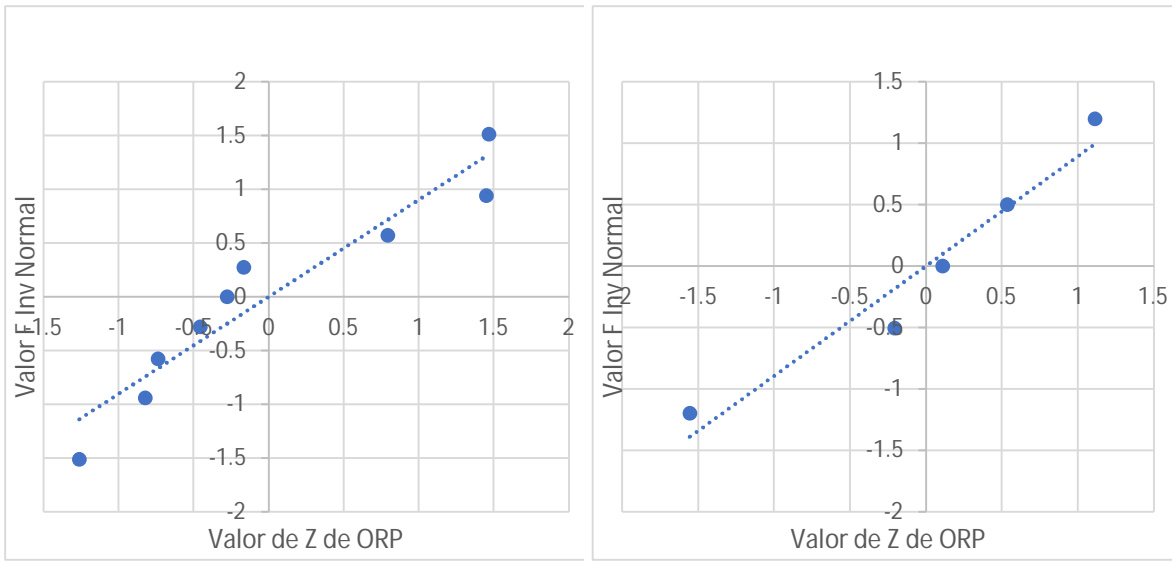


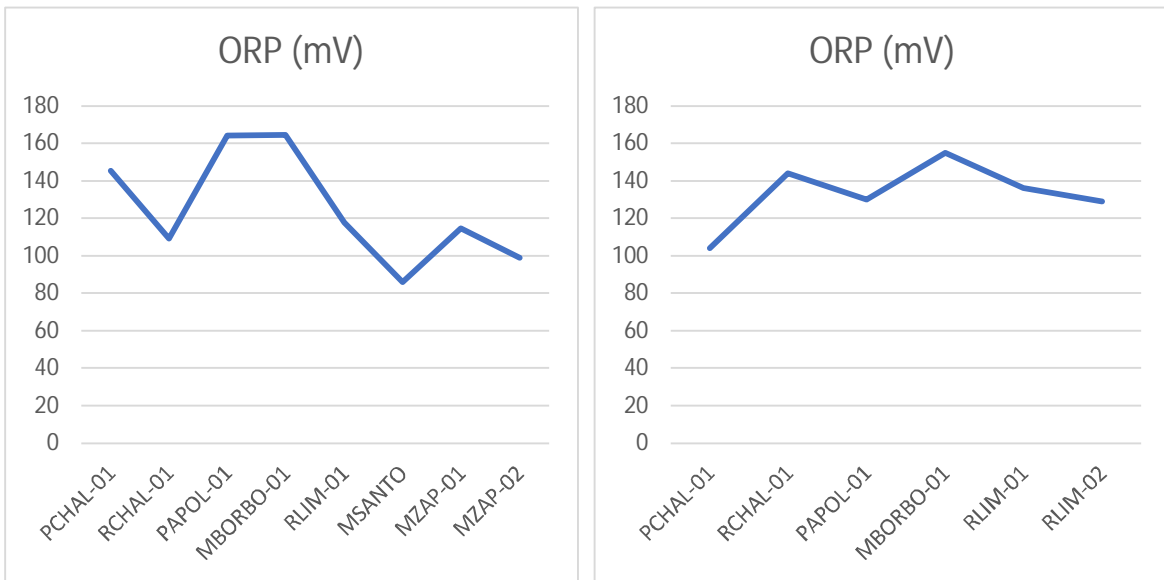
Figura 4.16. Gráfico de boxplot de ORP (mV)



Estación lluviosa

Estación seca

Figura 4.17. Gráfica de probabilidad normal de ORP



Estación lluviosa

Estación seca

Figura 4.18. Gráfico de línea de ORP (mV)

En la Figura 4.18 se observa que el máximo valor de ORP en la época lluviosa se encuentra en PAPOL-01 y MBORBO-01, mientras que el mínimo corresponde a MSANTO. Durante la época seca el valor máximo de ORP está en MBORBO-01 y el mínimo en PCHAL-01.

4.1.7 Concentración de Calcio

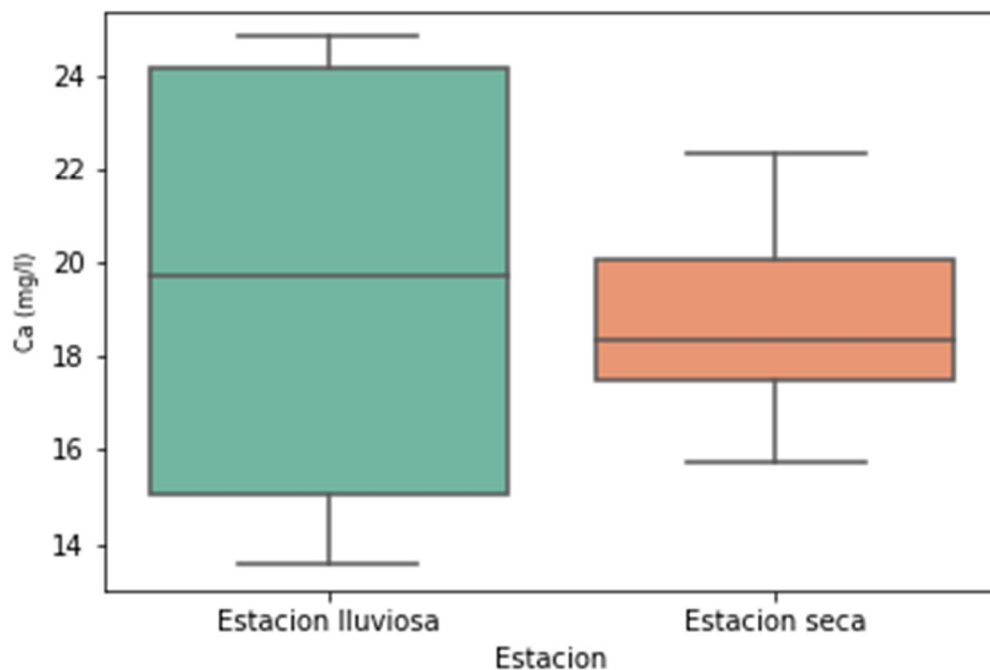
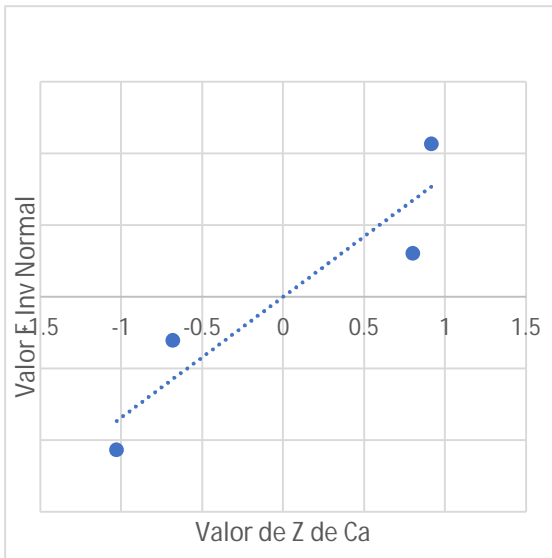


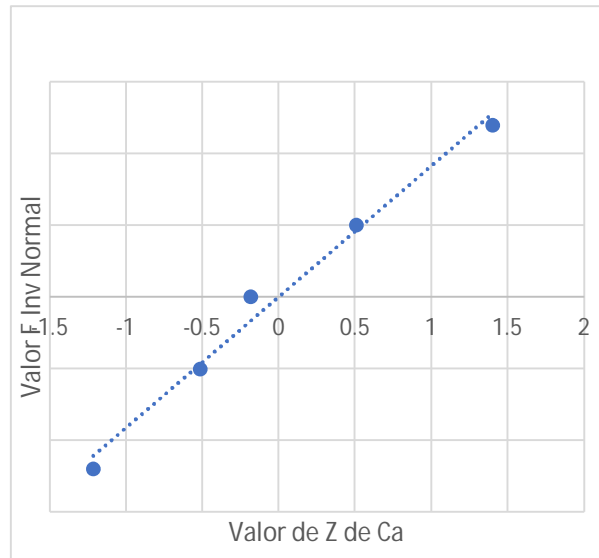
Figura 4.19. Gráfica de boxplot de concentración de Ca (mg/l)

En la estación lluviosa, se observa en el diagrama de boxplot de concentración de calcio de la Figura 4.19 que la mediana (19.42 mg/l) está ligeramente desplazada hacia el tercer cuartil (24.11 mg/l). La serie no tiene datos atípicos. El coeficiente de asimetría es -0.0743 y el de curtosis estandarizados es -2.1840 revelan que podría tratarse de una distribución normal pero el gráfico de probabilidad normal no evidencia normalidad en los datos.

Para la estación seca, se observa que la mediana (18.34 mg/l) está ligeramente desplazada hacia el cuartil I (17.5 mg/l). En el boxplot no se observan valores atípicos. Los valores de los coeficientes estandarizados de asimetría (0.3642) y de curtosis (-0.1232) revelan que se trata de una distribución normal. Esto último se confirma en el gráfico de probabilidad normal de la Figura 4.20.

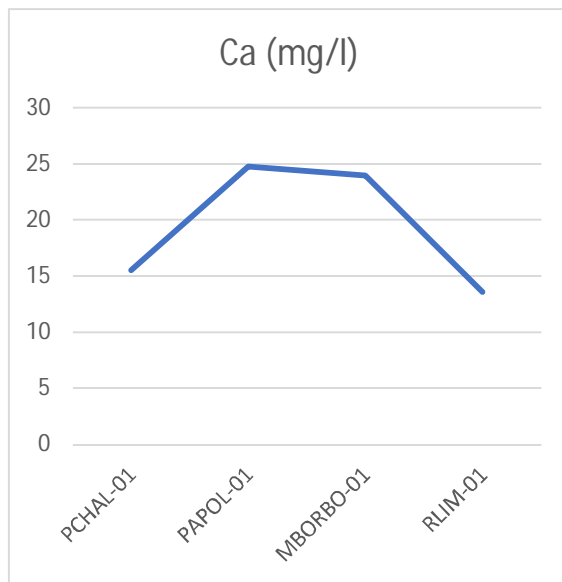


Estación lluviosa

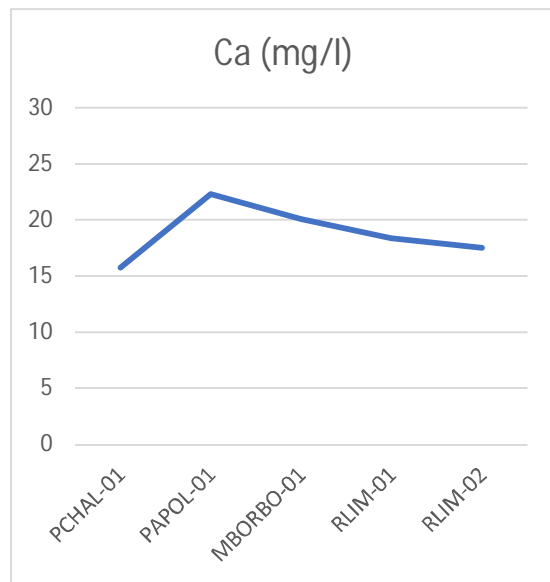


Estación seca

Figura 4.20. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de Ca



Estación lluviosa



Estación seca

Figura 4.21. Gráfico de línea de concentración Ca (mg/l)

Se observa en la Figura 4.21, que, en época lluviosa, el valor mínimo de concentración de calcio se encuentra en RLIM-01. Para la época seca el valor mínimo se encuentra en PCHAL-01. El valor máximo para ambas épocas se encuentra en PAPOL-01.

4.1.8 Concentración de Magnesio

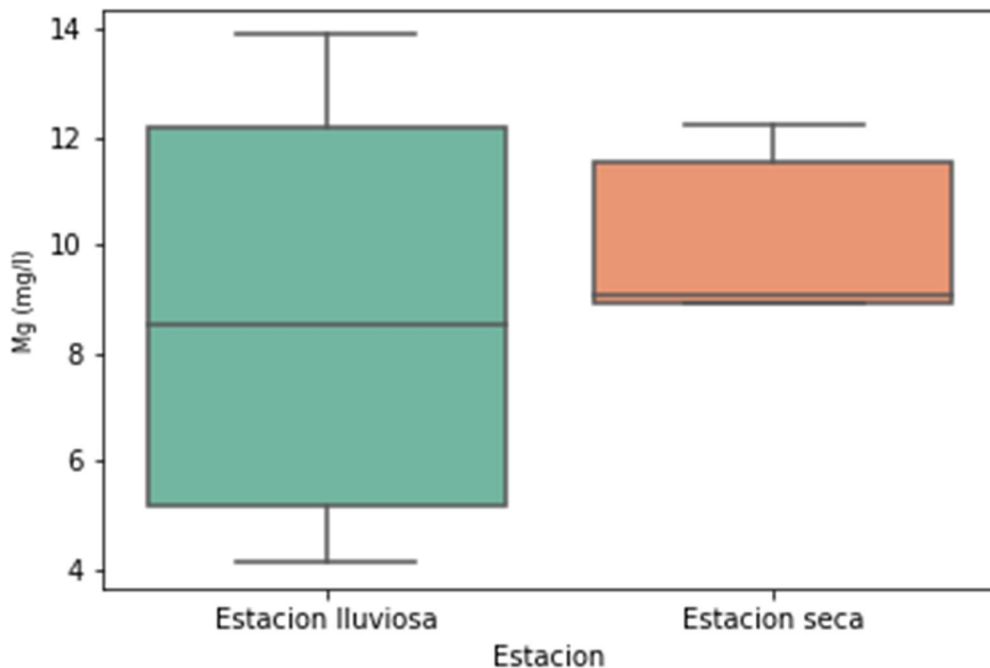
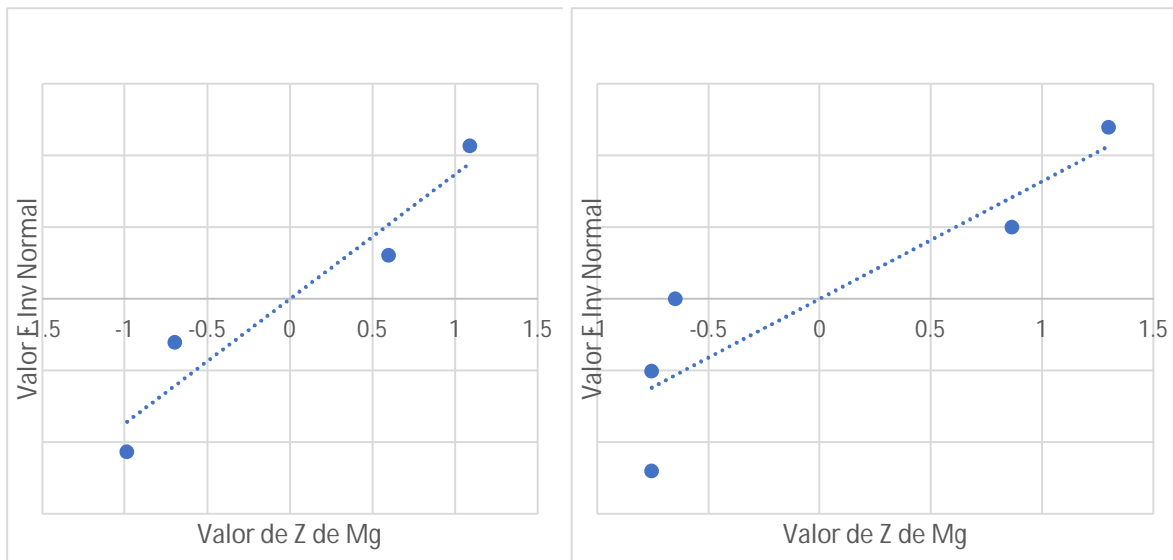


Figura 4.22. Gráfico de boxplot de concentración de Mg (mg/l)

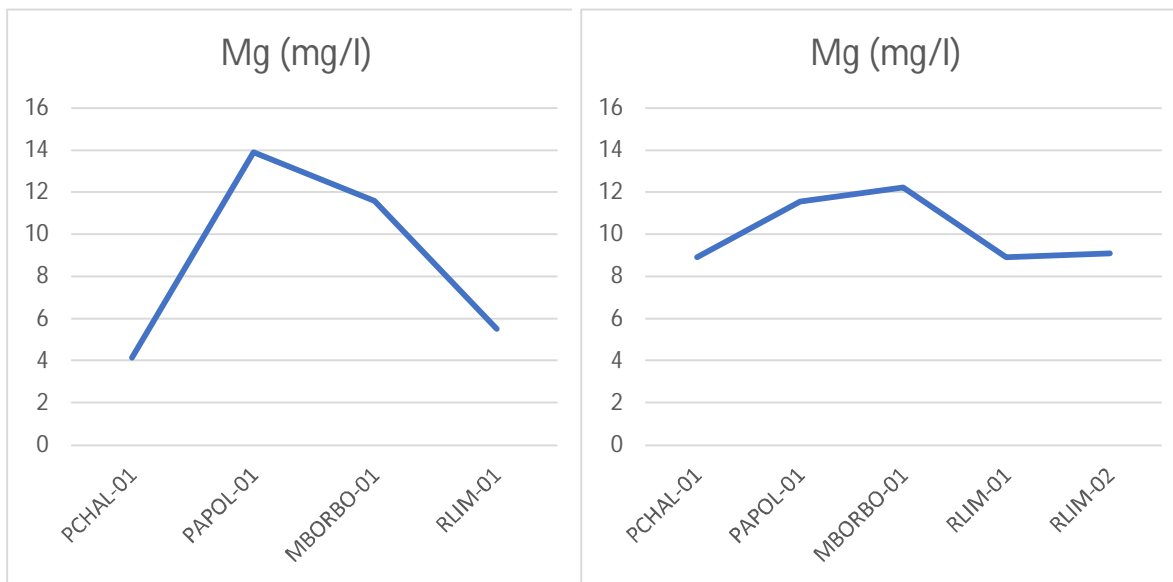
Para la estación lluviosa se observa en el diagrama de boxplot de concentración de magnesio de la Figura 4.22 que la mediana (8.55 mg/l) está ubicado a igual distancia del cuartil I (5.16 mg/l) y del cuartil III (12.75). No hay datos atípicos. El coeficiente de asimetría estandarizado (0.1068) y el coeficiente de curtosis estandarizado (-1.8249) revelan que se trata de una distribución normal. Y esto se evidencia en el gráfico de probabilidad normal. En la estación seca, no se observan datos atípicos. Además, la mediana (9.1 mg/l) se encuentra desplazada hacia el primer cuartil (8.93 mg/l). Los coeficientes estandarizados de asimetría (0.6444) y curtosis (-1.2371) reflejan que se trata de una distribución normal, sin embargo, en la Figura 4.23 no es posible observar normalidad en los datos.



Estación lluviosa

Estación seca

Figura 4.23. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de Mg.



Estación lluviosa

Estación seca

Figura 4.24. Gráfico de línea de concentración de Mg (mg/l)

En la Figura 4.24, se observa que en la época lluviosa PCHAL-01 tiene el valor mínimo de concentración de Mg. Para la época seca el valor mínimo se encuentra en RCHAL-01. Con respecto

al máximo este se encuentra en PAPOL-01, durante la época lluviosa, y en MBORBO-01, durante la época seca.

4.1.9 Concentración de Potasio

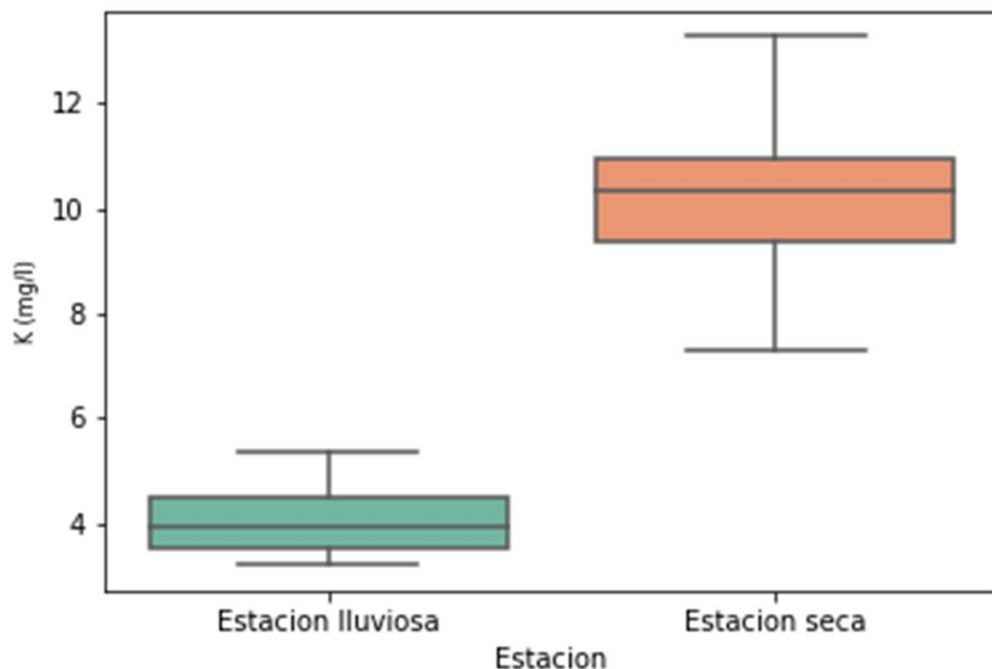
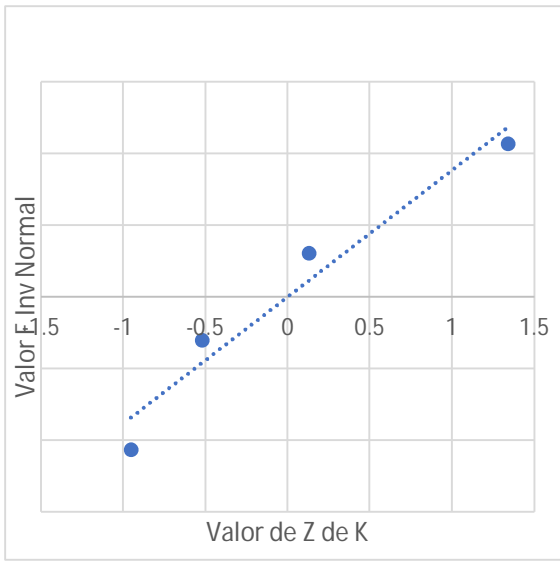


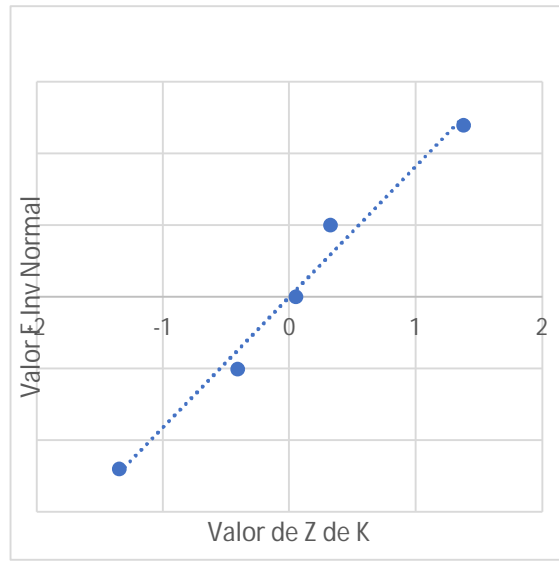
Figura 4.25. Gráfico de boxplot de concentración de K (mg/l)

En la estación lluviosa puede observarse en el diagrama de boxplot de concentración de potasio de la Figura 4.25 que la serie no contiene datos atípicos. La mediana (3.93 mg/l) se encuentra desplazada hacia el cuartil I (3.53 mg/l). El coeficiente de asimetría estandarizado (0.7722) y el de curtosis (0.1414) estandarizado revelan que se trata de una distribución normal. Esto se confirma en el diagrama de probabilidad normal.

Para la estación seca, no se observan valores atípicos. La mediana (10.35 mg/l) tiene cierto desplazamiento hacia el cuartil III (10.95 mg/l). Los valores de los coeficientes estandarizados de asimetría (0.0555) y de curtosis (0.3308) indican que se trata de una distribución normal, tal y como lo muestra la Figura 4.26.

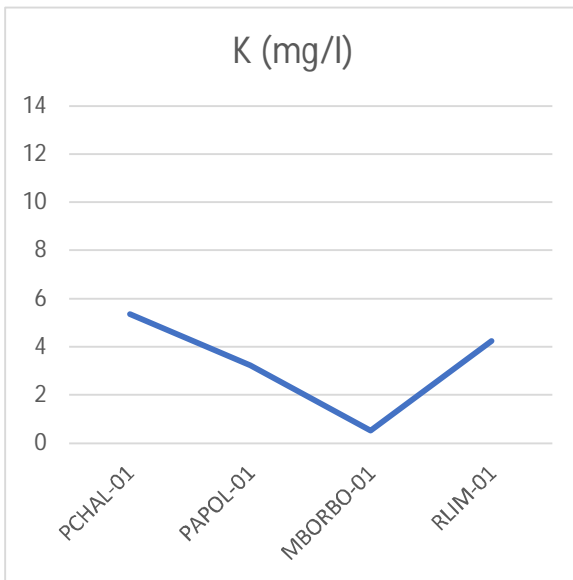


Estación Iluviosa

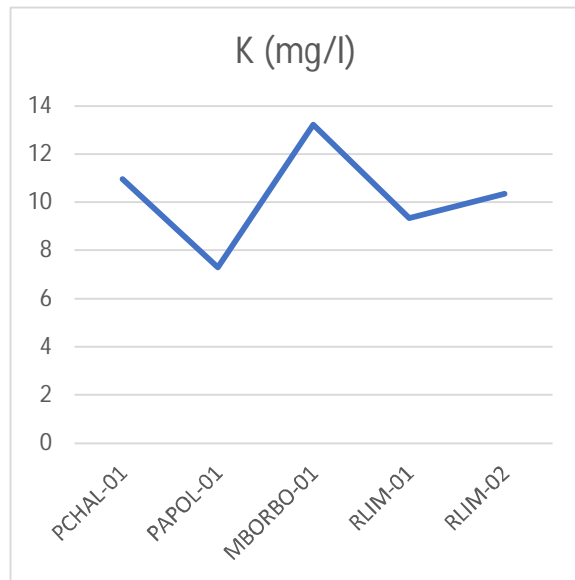


Estación seca

Figura 4.26. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de K



Estación Iluviosa



Estación seca

Figura 4.27. Gráfico de línea de concentración de K (mg/l)

Para la concentración de K, la Figura 4.27 muestra que, durante la época lluviosa, MBORBO-01 tiene el valor mínimo; el valor máximo está ubicado en PCHAL-01. Ahora bien, para la época seca, el valor mínimo se encuentra en PAPOL-01, y el máximo en MBORBO-01.

4.1.10 Concentración de Sodio

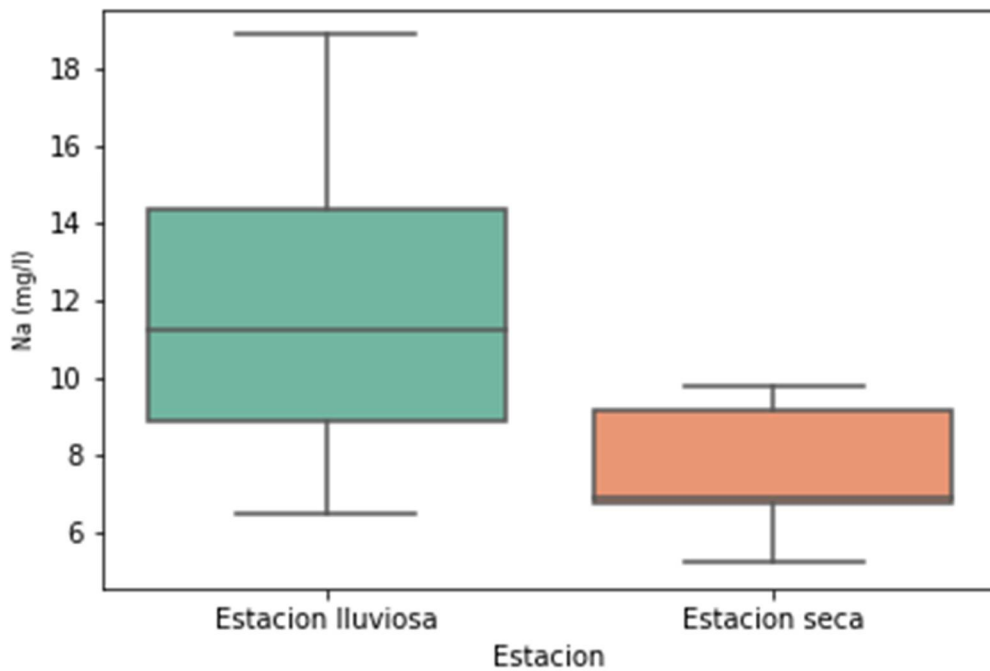


Figura 4.28. Gráfico de boxplot de concentración de Na (mg/l)

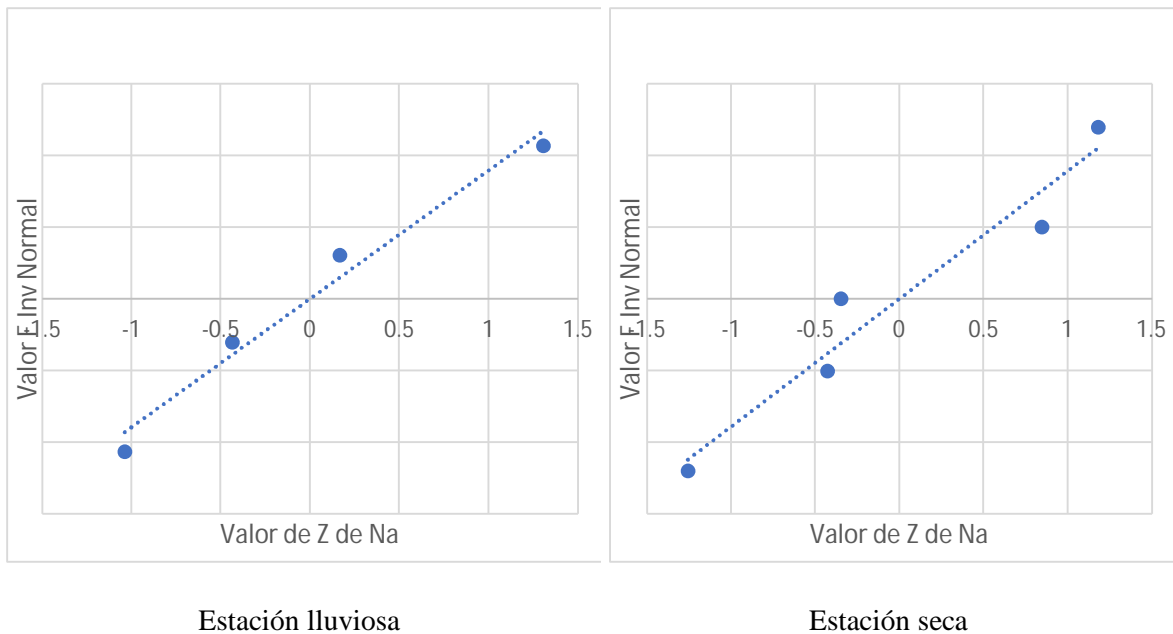


Figura 4.29. Diagrama de probabilidad normal de la concentración de Na

Para la estación lluviosa, la serie de concentración de sodio no tiene datos atípicos. La mediana (11.25 mg/l) está ligeramente desplazada hacia el primer cuartil (8.85 mg/l). Los coeficientes estandarizados de asimetría (0.5619) y de curtosis (0.0758) revelan que se trata de una distribución normal y así lo confirma el gráfico de probabilidad normal.

En la estación seca, no se observan datos atípicos. La mediana (6.9 mg/l) está desplazada un tanto hacia el cuartil I (6.75 mg/l). Los coeficientes estandarizados de asimetría (0.0583) y de curtosis (-0.7896) reflejan que se trata de una distribución normal, lo que se refleja en la Figura 4.29.

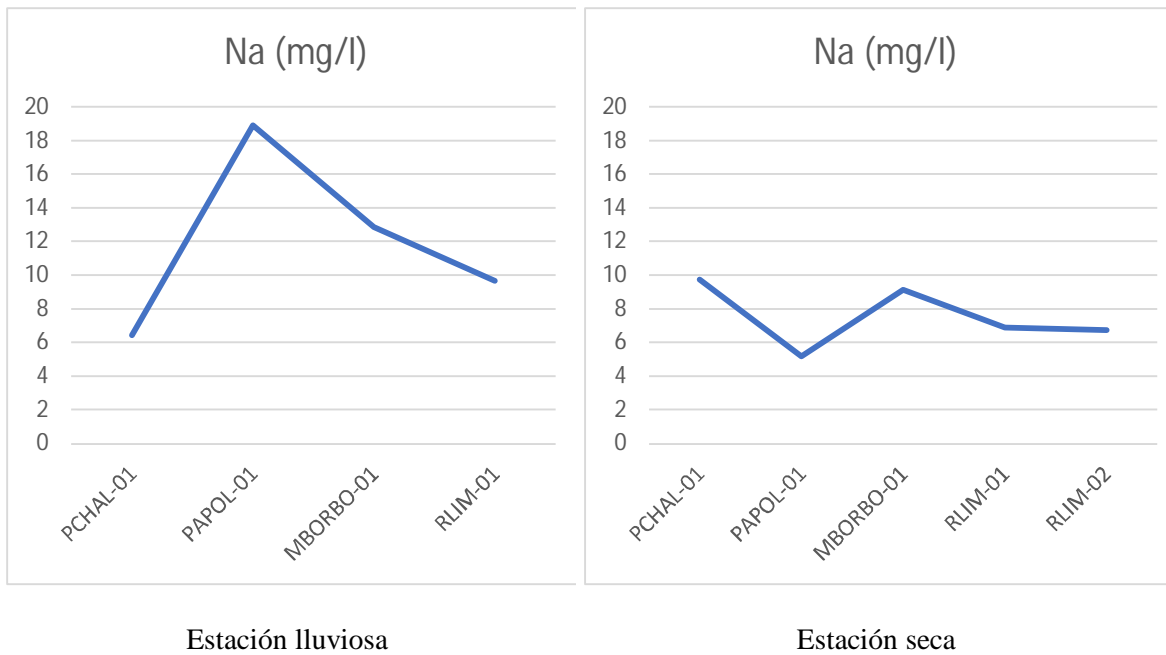


Figura 4.30. Gráfico de línea de concentración de Na (mg/l)

En la Figura 4.30, puede observarse que el valor mínimo se ubica en PCHAL-01 en época lluviosa y en PAPOL-01 en época seca. Mientras que el valor máximo se ubica en PAPOL-01 en época lluviosa. Para la época seca, el máximo se encuentra en PCHAL-01.

4.1.11 Concentración de Cloruro

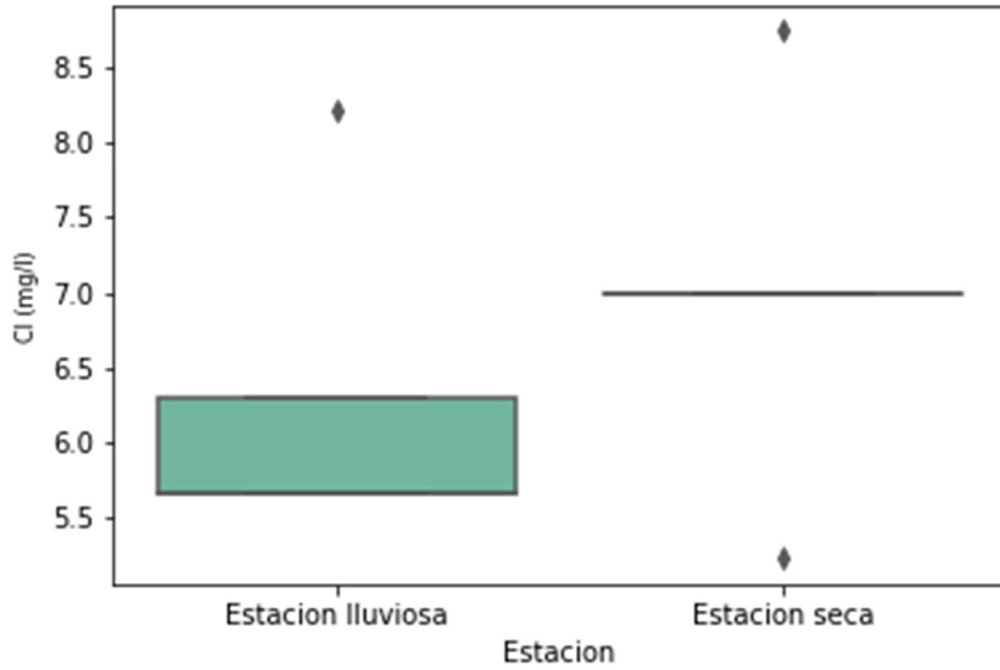


Figura 4.31. Gráfico de boxplot de concentración de Cl (mg/l).

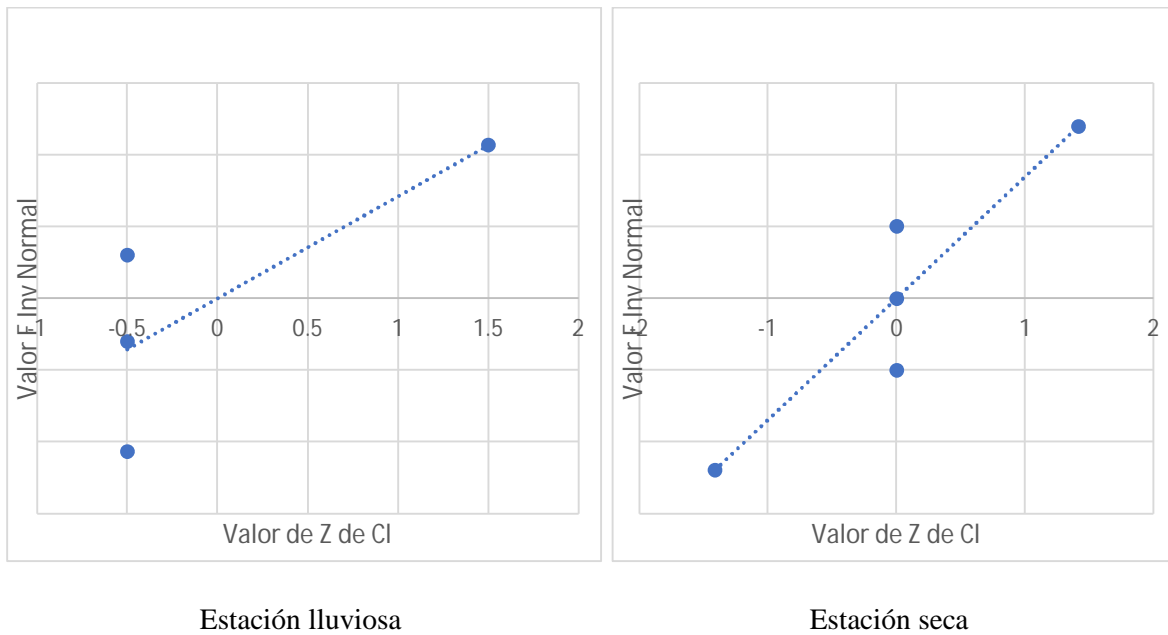


Figura 4.32. Gráfico de probabilidad de la concentración de Cl

Para la estación lluviosa se observa en el diagrama de boxplot de concentración de cloruro de la Figura 4.31 que la mediana (5.67 mg/l) coincide con el cuartil I (5.67 mg/l). También se observa un dato atípico (8.22 mg/l). Sin embargo, los coeficientes de asimetría (1.6330) y de curtosis estandarizado (1.6330) se encuentran dentro del rango normal de una distribución normal (-2 a 2), si bien el gráfico de probabilidad normal de la Figura 4.32 no refleja normalidad en los datos. Para la estación seca, en el diagrama de boxplot se observan dos datos atípicos. Dado que tres de los datos son igual a 6.99 mg/l no se observan desviaciones de la mediana con respecto a los cuartiles. Con respecto al diagrama de probabilidad normal se observa normalidad en los datos.

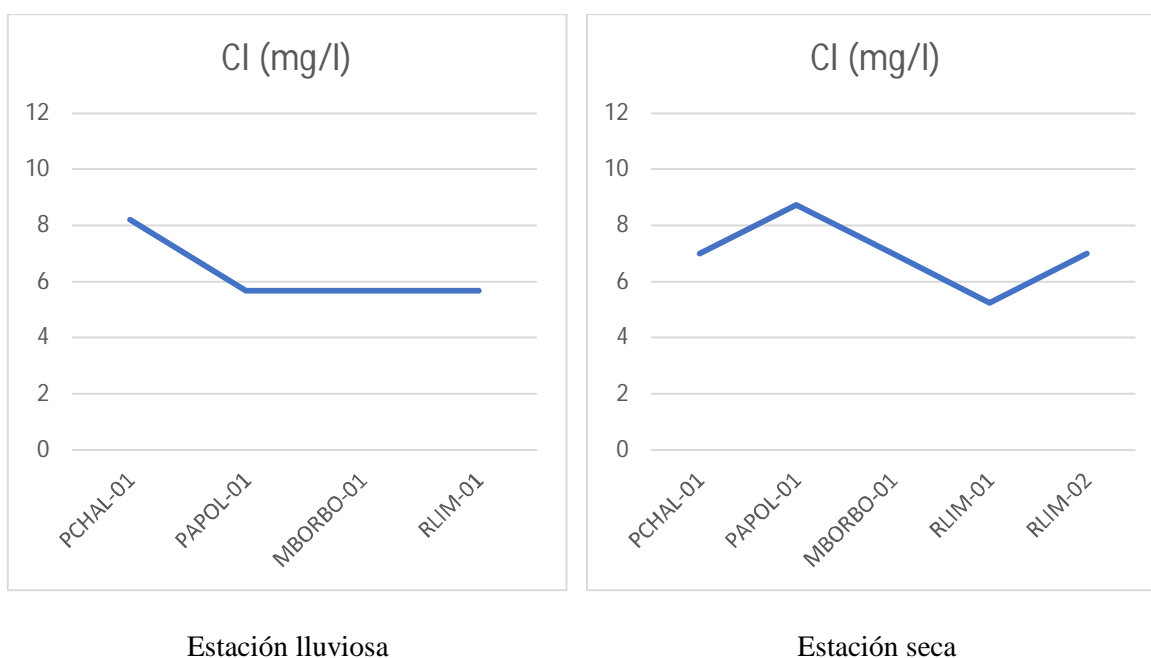


Figura 4.33. Gráfico de línea de concentración de Cl (mg/l)

Puede observarse en la Figura 4.33, que, durante la época lluviosa, la concentración de Cl presenta un máximo en PCHAL-01; mientras que para la época seca este máximo se encuentra en PAPOL-01. Con respecto a los valores mínimos, estos se encuentran en PAPOL-01, MBORBO-01 y RLIM-01 para la época lluviosa; para la época seca los valores mínimos se encuentran en RLIM-01.

4.1.12 Concentración de Bicarbonato/Carbonato

En la estación lluviosa, la mediana (116.50 mg/l) se encuentra a igual distancia del primer cuartil (83.49 mg/l) y del tercer cuartil (150.63 mg/l) según se observa en Figura 4.34. La serie de concentración de bicarbonato/carbonato no cuenta con datos atípicos. El coeficiente estandarizado de asimetría es 0.0118 y el de curtosis es -2.4141. Puede observarse que en el gráfico de probabilidad normal de la Figura 4.35 no se evidencia normalidad en los datos. Para la estación seca, en el diagrama de boxplot no se observan datos atípicos. La mediana (93.83 mg/l) no está desplazada hacia ninguno de los cuartiles. Los coeficientes estandarizados de asimetría (0.3013) y de curtosis (-1.0019) revelan que se trata de una distribución normal y esto se refleja en el gráfico de probabilidad normal.

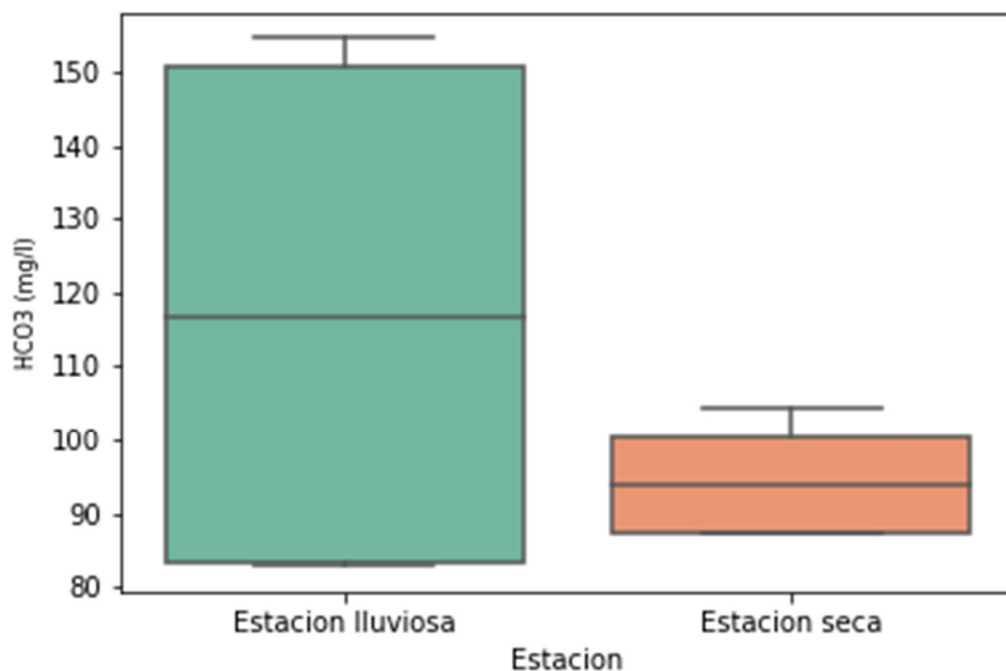
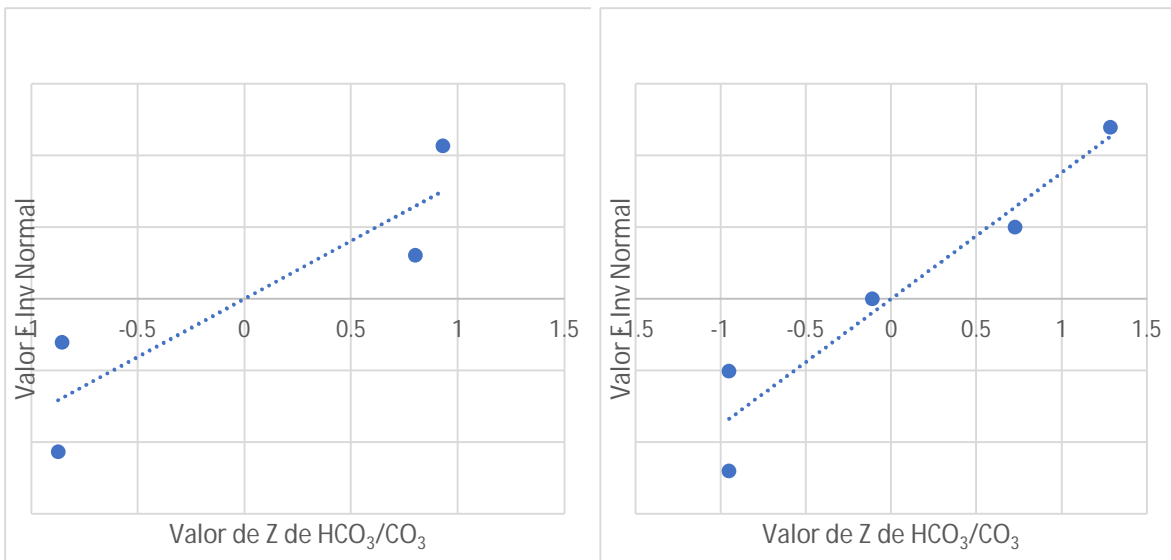


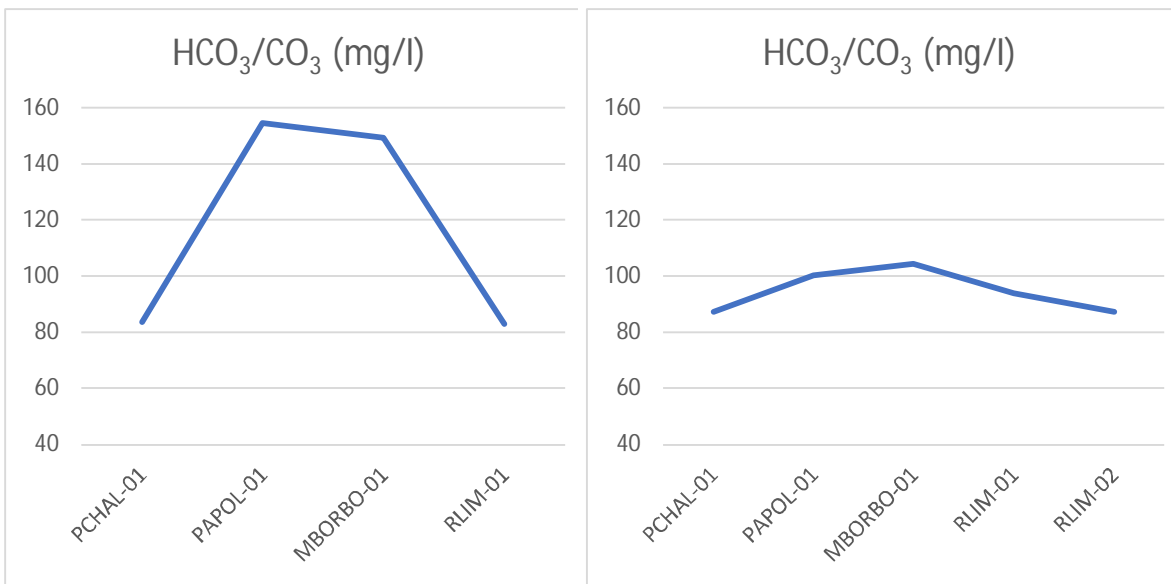
Figura 4.34. Gráfica de boxplot de concentración de HCO₃/CO₃ (mg/l).



Estación lluviosa

Estación seca

Figura 4.35. Gráfico de probabilidad de la concentración de $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3$



Estación lluviosa

Estación seca

Figura 4.36. Gráfico de línea de concentración de $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3$ (mg/l).

En la Figura 4.36, puede observarse que en la época lluviosa hay un mínimo en RLIM-01, mientras que el valor máximo se encuentra en PAPOL-01. Para la estación seca, el valor mínimo se encuentra tanto en PCHAL-01 como en RLIM-02; el valor máximo se encuentra en MBORBO-01.

4.1.13 Concentración de Sulfato

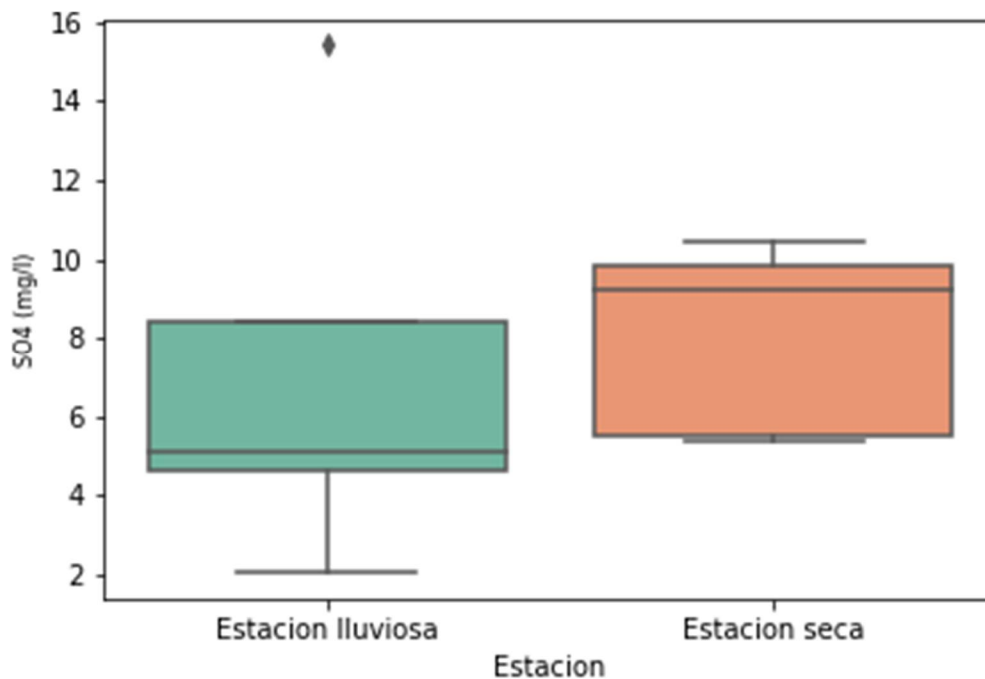
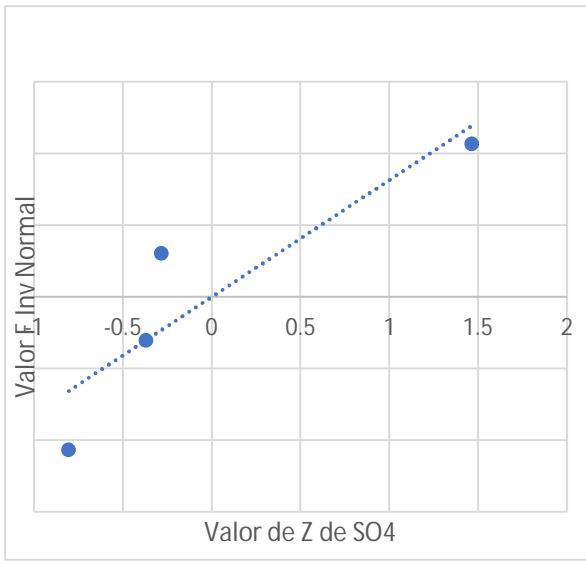
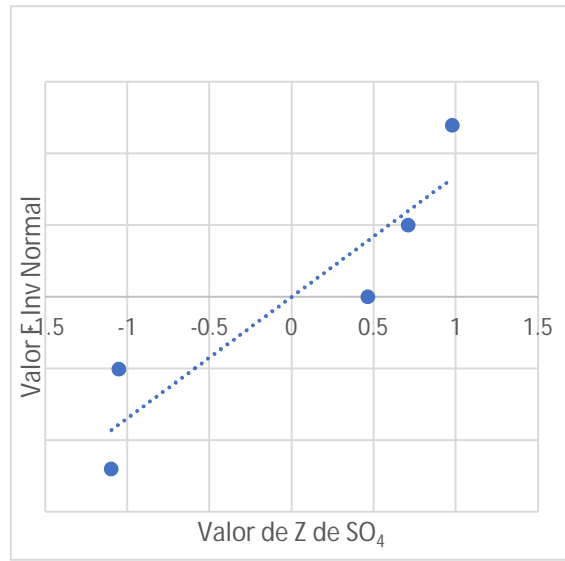


Figura 4.37. Gráfico de boxplot de la concentración de SO_4 (mg/l)

Para la estación lluviosa, se observa en el diagrama boxplot de la Figura 4.37 que la mediana (5.12 mg/l) está desplazada hacia el primer cuartil (4.87 mg/l). La serie de concentración de sulfatos tiene un dato atípico (15.42 mg/l) que está afectando el valor de la media (6.80 mg/l). Además, tanto el coeficiente de asimetría estandarizado (1.3712) como el coeficiente de curtosis estandarizado (1.2878) reflejan que hay que considerar una distribución normal para esta serie de datos. A pesar de esto último, el diagrama de probabilidad normal de la Figura 4.38 no evidencia normalidad en los datos. Para la estación seca, se observa que la mediana (9.21 mg/l) está desplazada hacia el tercer cuartil (9.81 mg/l). No se observan datos atípicos. Los valores de los coeficientes estandarizados de asimetría (-0.4194) y de curtosis (-1.4153) revelan que se trata de una distribución normal si bien en el diagrama de probabilidad normal no se observa normalidad en los datos (véase Figura 4.38)

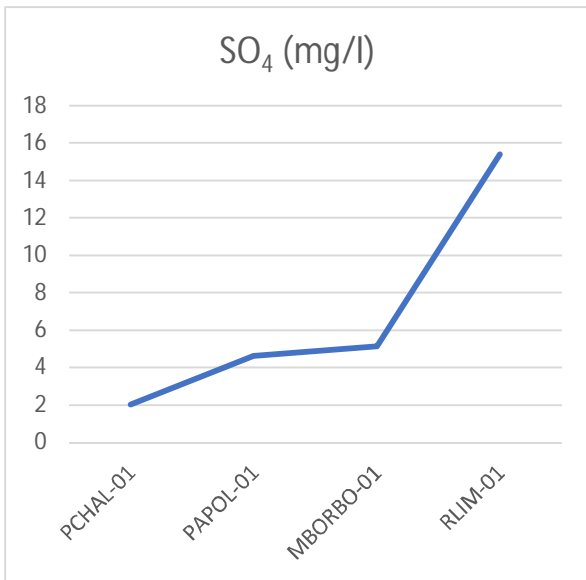


Estación lluviosa

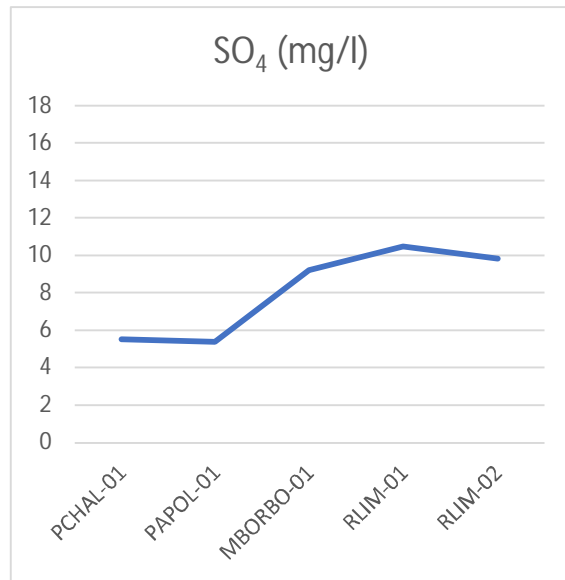


Estación seca

Figura 4.38. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de SO₄



Estación lluviosa



Estación seca

Figura 4.39. Gráfico de línea de la concentración de SO₄ (mg/l)

En la Figura 4.39, puede observarse que en la época lluviosa hay un mínimo en PCHAL-01 y un máximo en RLIM-01. Para la época seca, el valor mínimo se encuentra en PAPOL-01 y el valor máximo está en RLIM-01.

4.1.14 Concentración de Fosfato

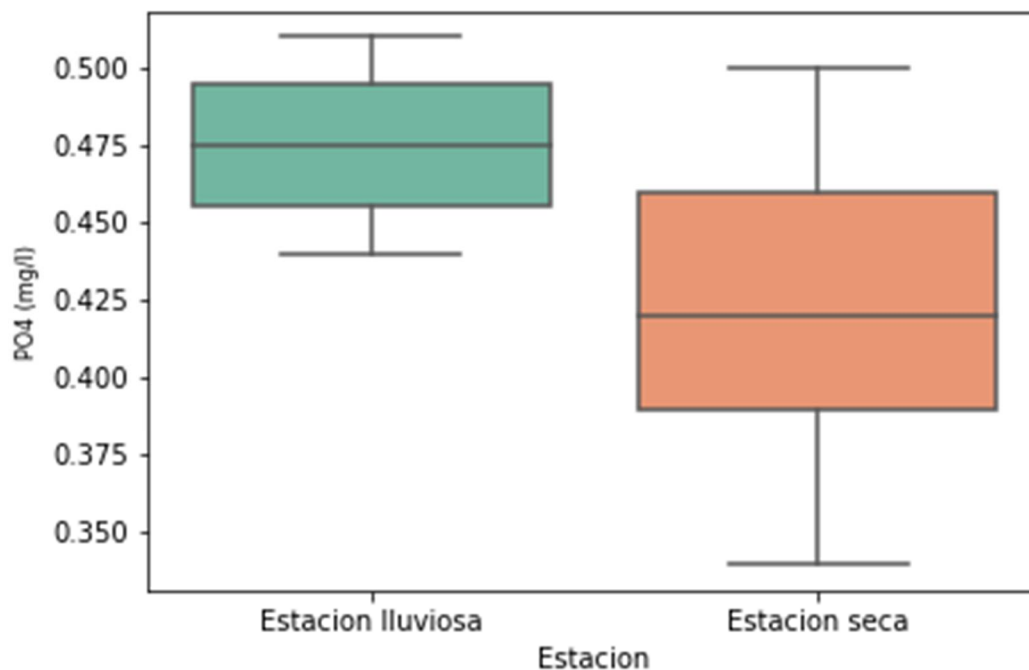


Figura 4.40. Gráfico de boxplot de la concentración de PO_4 (mg/l)

En la estación lluviosa, la mediana (0.48 mg/l) está a igual distancia del cuartil I (0.46 mg/l) y del tercer cuartil (0.50 mg/l). Además, los valores estandarizados de los coeficientes de asimetría (0.0000) y de curtosis (-0.9932) reflejan que la serie de datos se encuentra dentro de los límites esperados para una distribución normal (-2 a 2) y esto se refleja en la Figura 4.41. En la estación seca, no se observan valores atípicos. La mediana (0.42 mg/l) está ligeramente desplazada hacia el cuartil I (0.39 mg/l). Los valores de los coeficientes estandarizados de asimetría (-0.0882) y de curtosis (-0.3140) reflejan que se trata de una distribución normal, lo cual se refleja en el diagrama de probabilidad normal.

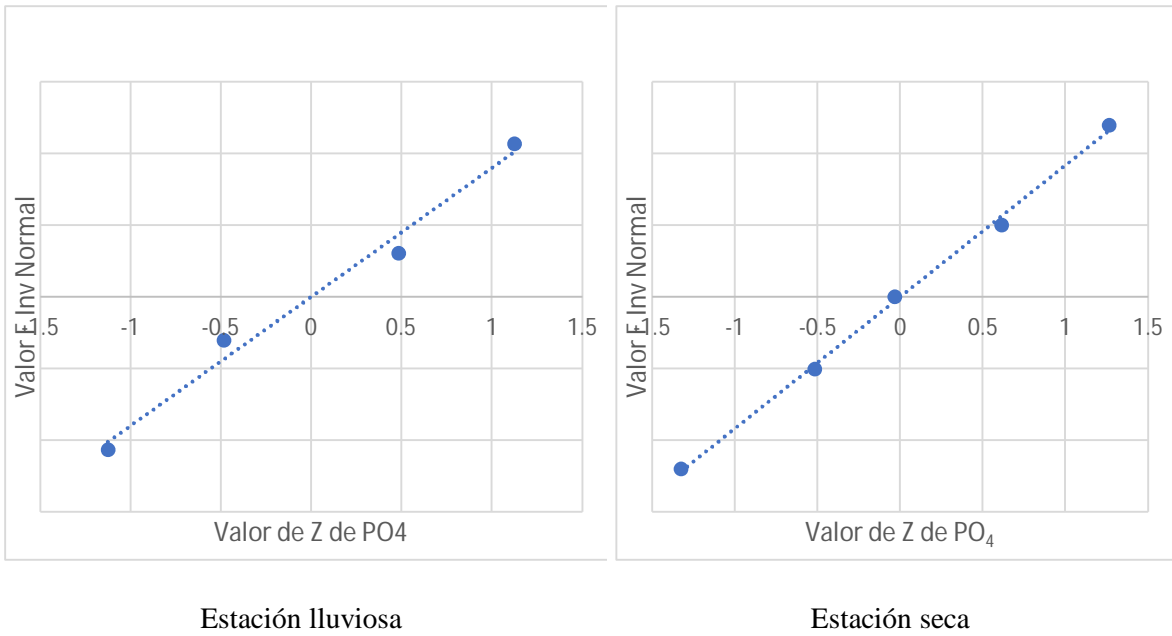


Figura 4.41. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de PO₄

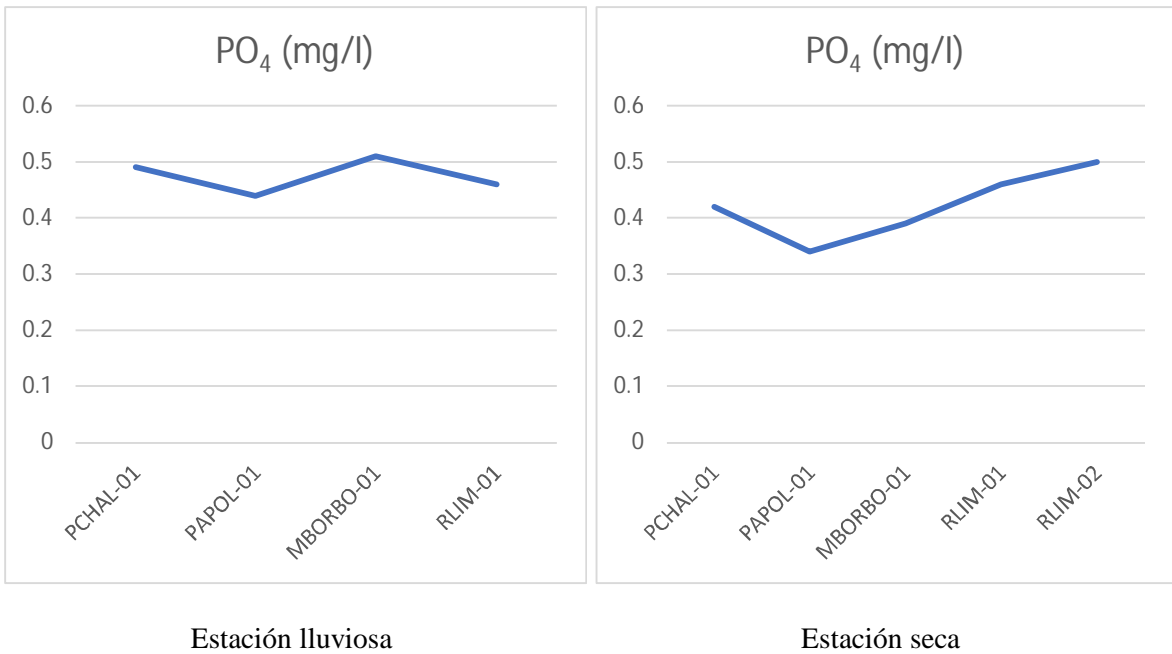


Figura 4.42. Gráfico de línea de la concentración de PO₄ (mg/l)

En la Figura 4.42, se observa que, en la época lluviosa y seca PAPOL-01 tiene un mínimo en concentración de PO_4 . Para la época lluviosa, el máximo se encuentra en BORBO-01 mientras que, para la época seca, el máximo se encuentra en RLIM-02.

4.1.15 Concentración de Nitrato

En la estación lluviosa, se observa un dato atípico (2.8 mg/l) que está afectando a la media (151 mg/l). La mediana (1.24 mg/l) se encuentra desplazada hacia el cuartil I (1.1 mg/l). Los coeficientes estandarizados de asimetría (1.263) y de curtosis (1.143) revelan que se trata de una distribución normal, si bien el diagrama de probabilidad normal de la Figura 4.44, no evidencia normalidad en los datos.

En la época seca, no se observan datos atípicos. La mediana (1.00 mg/l) se encuentra desplazada hacia el tercer cuartil (0.88 mg/l). Los coeficientes estandarizados de asimetría (-1.8796) y de curtosis (1.9942) se encuentran cerca del límite inferior (-2) y superior (+2) respectivamente para clasificar a una serie de datos como perteneciente a una distribución normal. Sin embargo, la Figura 4.44, no muestra normalidad en los datos.

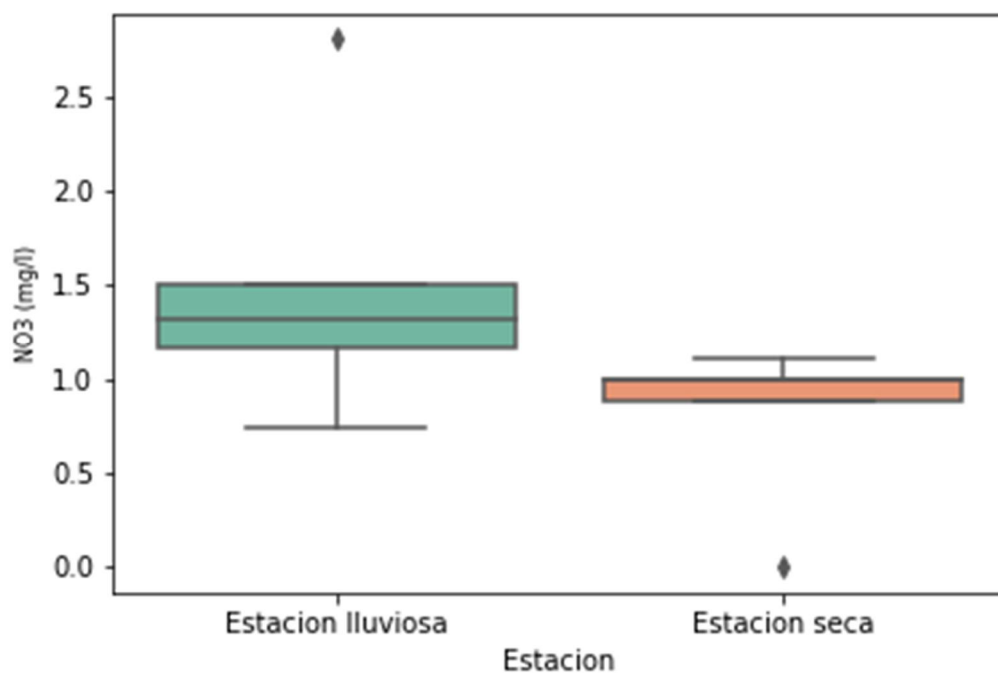
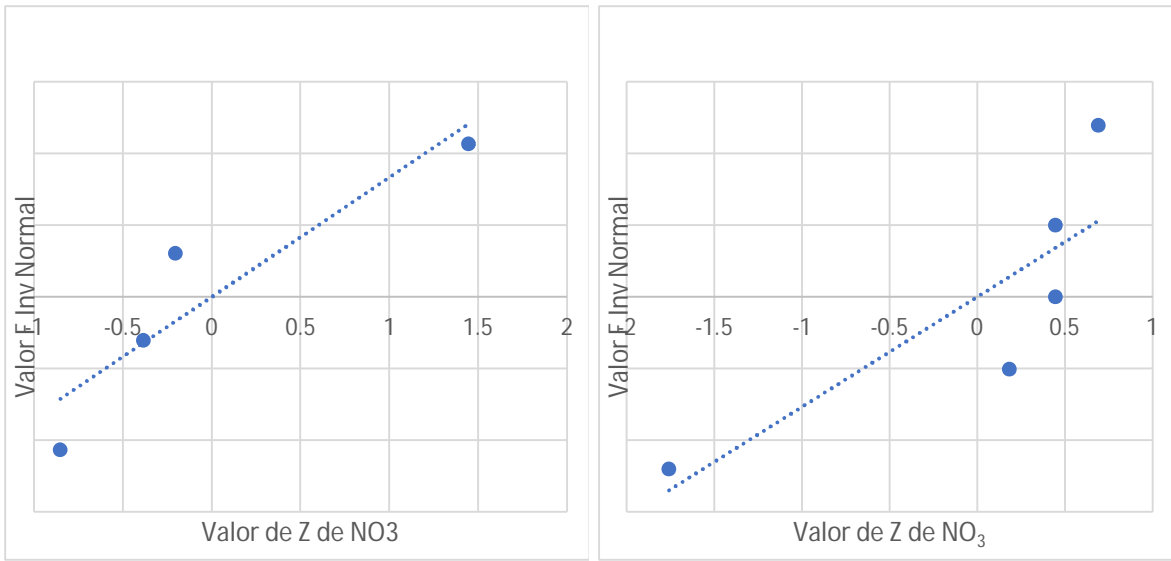


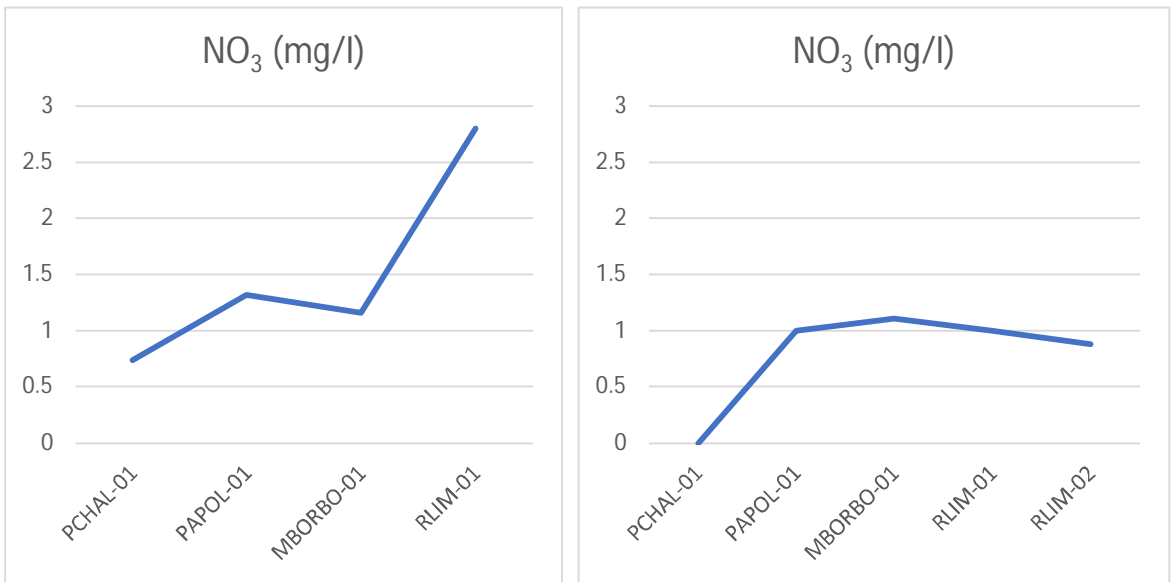
Figura 4.43. Gráfico de boxplot de la concentración de NO_3 (mg/l)



Estación lluviosa

Estación seca

Figura 4.44. Gráfico de probabilidad normal de la concentración de NO₃



Estación lluviosa

Estación seca

Figura 4.45. Gráfico de línea de concentración de NO₃ (mg/l)

Se observa en la Figura 4.45, que hay un máximo en RCHAL-01 para la época lluviosa; mientras que el mínimo se encuentra en PCHAL-01 y MBORBO-01. Para la época seca, hay un máximo en MBORBO-01 y un mínimo en PCHAL-01.

4.2 Balance iónico

Al realizar el balance iónico para la primera muestra, época lluviosa, de la Tabla 4.1, Pchal-01 obtenemos lo siguiente:

Tabla 4.5. Datos de concentraciones para el sitio de muestreo Pchal-01

Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
6.45 mg/l	5.35 mg/l	15.54 mg/l	4.14 mg/l	8.22 mg/l	83.66 mg/l	2.05 mg/l	0.74 mg/l	0.49 mg/l

Tabla 4.6. Cálculo de miliequivalentes por litro para porcentajes de error de balance eléctrico en Pchal-01

	mg/l	Masa molar	mmol/L	Carga	meq/L
Na ⁺	6.45	/22.99	=0.2806	X 1	= 0.2806
K ⁺	5.35	/39.09	=0.1369	X 1	= 0.1369
Ca ²⁺	15.54	/40.08	=0.3877	X 2	= 0.7754
Mg ²⁺	4.14	/24.31	=0.1704	X 2	= 0.3406

$$\sum z m_c = 1.5335$$

Cl ⁻	8.22	/35.45	=0.2319	X 1	= 0.2319
HCO ₃ ⁻	83.66	/61.02	=1.3710	X 1	= 1.3710
SO ₄ ²⁻	2.05	/96.06	=0.0213	X 2	= 0.0426
NO ₃ ⁻	0.74	/62.00	=0.0119	X 1	= 0.0119

PO_4^{3-}	0.49	/94.97	=0.0052	X 3	= 0.0155
--------------------	------	--------	---------	-----	----------

$$\sum z m_a = 1.6729$$

Ahora sustituimos valores en la ecuación 10:

$$\text{error}(\%) = \frac{\sum z m_c - \sum z m_a}{\sum z m_c + \sum z m_a} * 100$$

Con $\sum z m_c = 1.5335$ y $\sum z m_a = 1.6729$

El balance eléctrico es:

$$\frac{(1.5335 - 1.6729) * 100}{(1.5335 + 1.6729)} = -4.35\%$$

De esta forma se calculan los balances de electroneutralidad o B.E.. de las demás muestras, resultado que se muestra en la Tabla 4.2 y Tabla 4.4. El balance eléctrico es menor a 10% para una conductividad de 149 $\mu\text{S}/\text{cm}$ menor a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este error, según la Tabla 2.3 es un error admisible. Ahora se utilizarán el diagrama de Piper, diagramas de Stiff, y mapas de isolíneas.

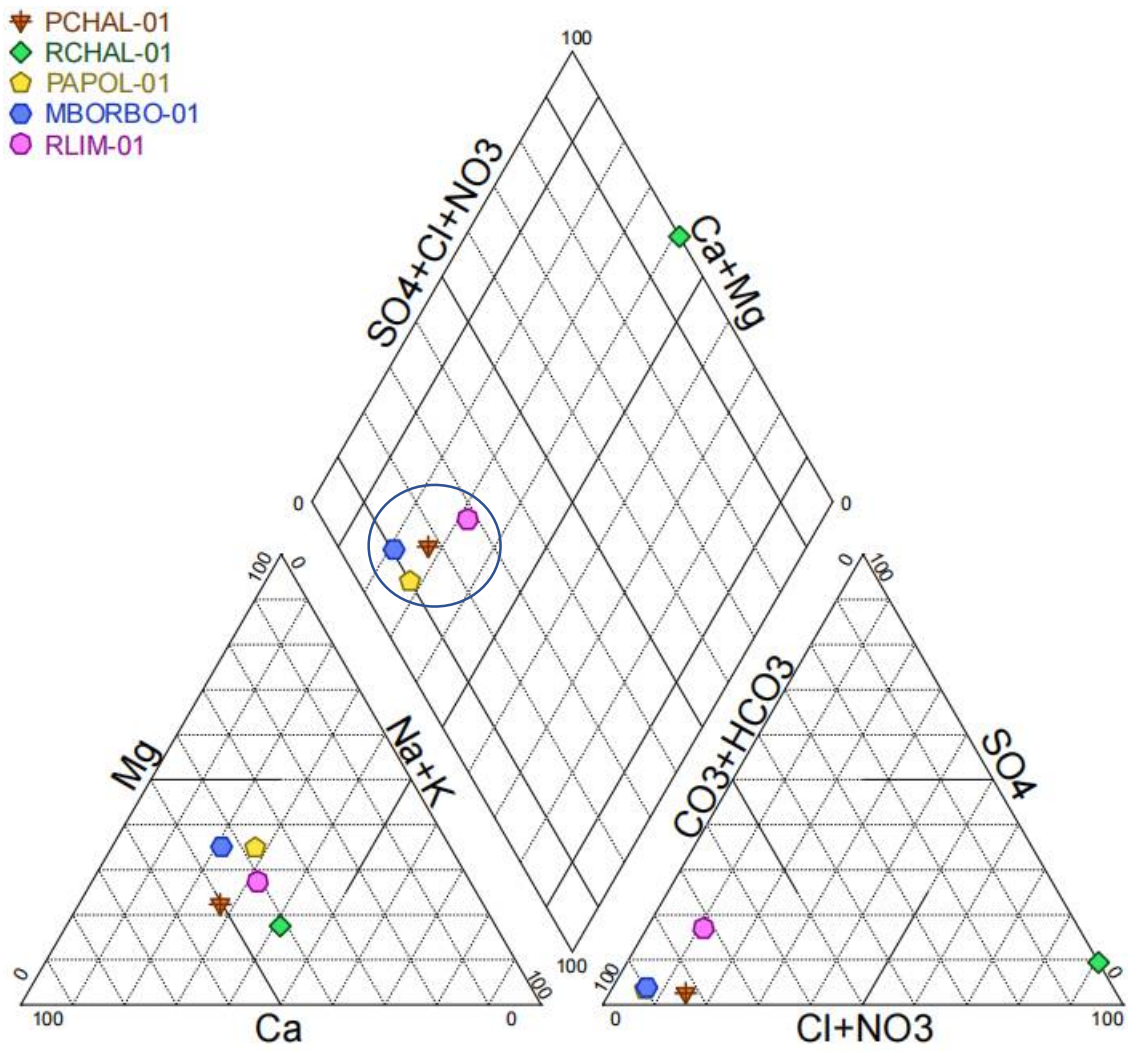


Figura 4.46. Diagrama de Piper, época lluviosa

4.3 Clasificación de las aguas de la microcuenca del río Los Limones

Como puede verse todas las muestras, a excepción de una, en la época lluviosa presentan propiedades de agua bicarbonatada cálcica y/o magnésica. Las concentraciones en meq/l para cada ion se muestra en los anexos.

En el caso de los aniones, de cinco muestras, tres son del tipo: $\text{rCO}_3\text{H} > \text{rCl} > \text{rSO}_4$, siendo la muestra RLIM-01 la que muestra un carácter del tipo $\text{rCO}_3\text{H} > \text{rSO}_4 > \text{rCl}$ y la muestra RCHAL-01 muestra características tipo $\text{rCl} > \text{rSO}_4 > \text{rCO}_3\text{H}$; con respecto a esta muestra el valor de carbonatos/bicarbonatos obtenido es de 0, lo cual, es sospechoso dado que la conductividad eléctrica para dicho sitio de muestreo fue de $70 \mu\text{S}/\text{cm}$. Se debe considerar que pudo haber un error en el muestreo y/o análisis de dicha muestra.

En el caso de los cationes cuatro muestras son del tipo $\text{rCa} > \text{rMg} > \text{rNa}$ y una muestra es del $\text{rCa} > \text{rNa} > \text{rMg}$.

En cuanto a la conductividad, PCHAL-01, RCHAL-01 y RLIM-01 tienen conductividades menores a $250 \mu\text{S}/\text{cm}$ (tipo C-1). Mientras que PAPOL-01 y MBOR-01 tienen conductividades mayores a 250 y menores que $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ (tipo C-2). La clasificación de las muestras se presenta en la Tabla 4.7.

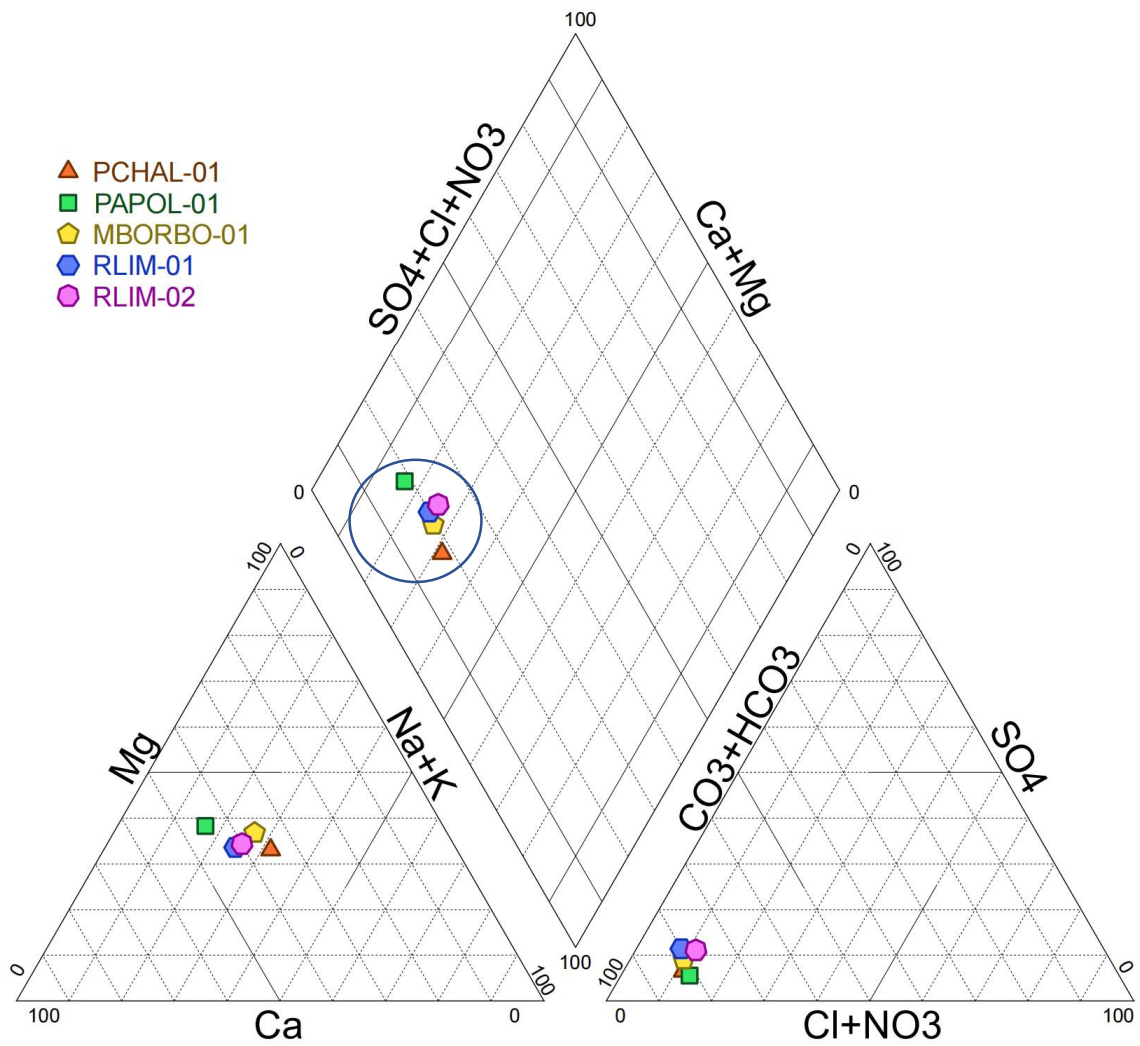


Figura 4.47. Diagrama de Piper, época seca

Tabla 4.7. Clasificación de muestras, época lluviosa

Muestra	Clasificación	
PCHAL-01	5-f-C-1	Bicarbonatada cálcica
RCHAL-01	1-e-C-1	Nitrada cálcica sódica
PAPOL-01	5-f-C 2	Bicarbonatada cálcica magnésica

Muestra	Clasificación	
MBORBO-01	5-f-C 2	Bicarbonatada cálcica magnésica
RLIM-01	6-f-C 1	Bicarbonatada cálcica magnésica

Para la época seca, en el caso de los aniones, de cinco muestras, tres son del tipo $\text{rCO}_3\text{H} > \text{rCl} > \text{rSO}_4$; las últimas dos correspondiendo a RLIM-01 y RLIM-02 muestran un carácter del tipo $\text{rCO}_3\text{H} > \text{rSO}_4 > \text{rCl}$. En el caso de los cationes cuatro muestras son del tipo $\text{rCa} > \text{rMg} > \text{rNa}$, y una es del tipo $\text{rMg} > \text{rCa} > \text{rNa}$.

En cuanto a la conductividad, todas las muestras tienen una conductividad menor a $250 \mu\text{S}/\text{cm}$ (tipo C-1). La clasificación de las aguas de la microcuenca del río Los Limones en la época seca se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.8. Clasificación de muestras, época seca

Muestra	Clasificación	
PCHAL-01	5-f-C-1	Bicarbonatada cálcica magnésica
MBORBO-01	5-d-C-1	Bicarbonatada magnésica cálcica
PAPOL-01	5-f-C-1	Bicarbonatada cálcica magnésica
RLIM-01	6-f-C-1	Bicarbonatada cálcica magnésica
RLIM-02	6-f-C-1	Bicarbonatada cálcica magnésica

Con respecto a las concentraciones en meq/l para los cationes y aniones, su porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes y las conductividades eléctricas de los puntos de muestreo se muestran en los Anexos, tanto para la estación lluviosa como seca.

Los diagramas de Stiff para la época lluviosa de los puntos de muestreo se presentan en el Mapa 4.2, Mapa 4.3 y en la Figura 4.48 se muestra a detalle estos diagramas⁹. Puede verse que PCHAL-01 (junta de agua ACRASAME) tiene pocos iones mayoritarios disueltos, estando ubicado dicho punto en la

⁹ Para este mapa y diagramas se utilizó un dato cuyo balance de electroneutralidad superaba el 10% para una conductividades entre 70 y $284 \mu\text{S}/\text{cm}$. Este punto de muestreo fue RCHAL-01.

cuenca media, cercano al río Chalchigüe. Por otro lado, un poco más al norte, aunque siempre a nivel de cuenca media, se observa que PAPOL-01 (junta de agua ARAS) y MBORBO-01 tienen una mayor cantidad de bicarbonato y carbonato disueltos. Ambos puntos de muestreo se ubican en la cercanía del río Los Amates.

Luego en la zona de cuenca baja, en la zona de confluencia de los ríos Chalchigüe y Los Amates que da origen al río Los Limones (RLIM-01), observamos unas concentraciones similares a PCHAL-01, probablemente debido a un proceso de dilución de las aguas.

Para la época seca, se muestran los diagramas de Stiff en el Mapa 4.4, y en la Figura 4.49¹⁰.

Para PCHAL-01 en la época seca se observa una cantidad similar de iones disueltos con respecto a la época lluviosa, sobre todo de bicarbonatos y carbonatos. La concentración de iones para PAPOL-01 y MBORBO-01 son bastante similares en cuanto a los bicarbonatos y carbonatos, aunque PAPOL-01 presenta una mayor concentración de Ca y menor concentración de Mg que MBORBO-01. Finalmente, RLIM-01 y RLIM-02 tienen concentraciones similares tanto para cationes como aniones.

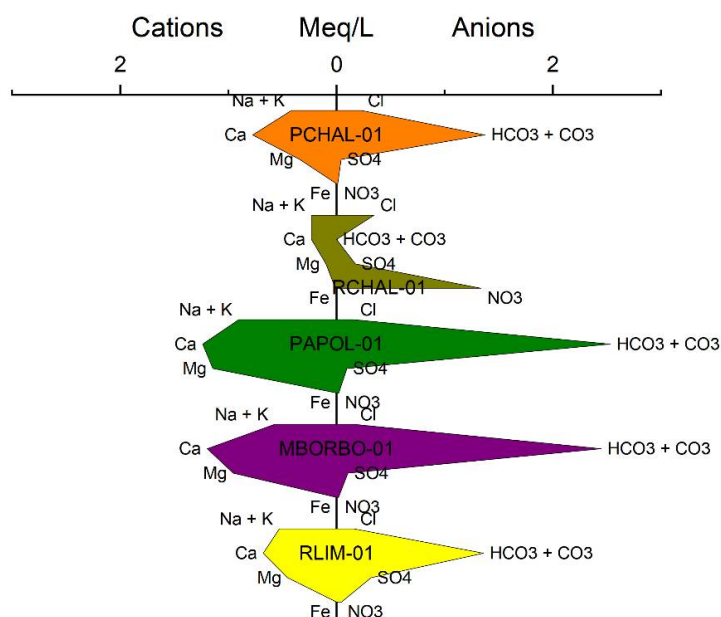


Figura 4.48. Diagramas de Stiff de puntos de muestreo, época lluviosa

¹⁰ Para este mapa y diagramas se utilizaron datos cuyos balances de electroneutralidad superaban el 10% para conductividades alrededor de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos puntos de muestreo fueron PCHAL-01 y MBORBO-01.

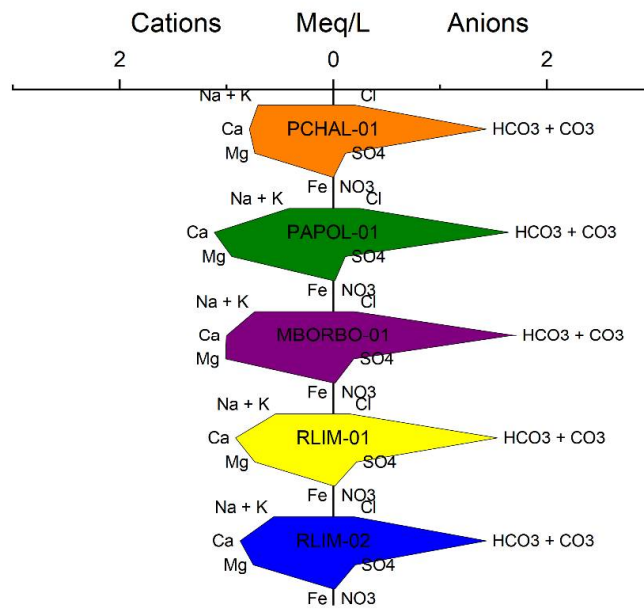
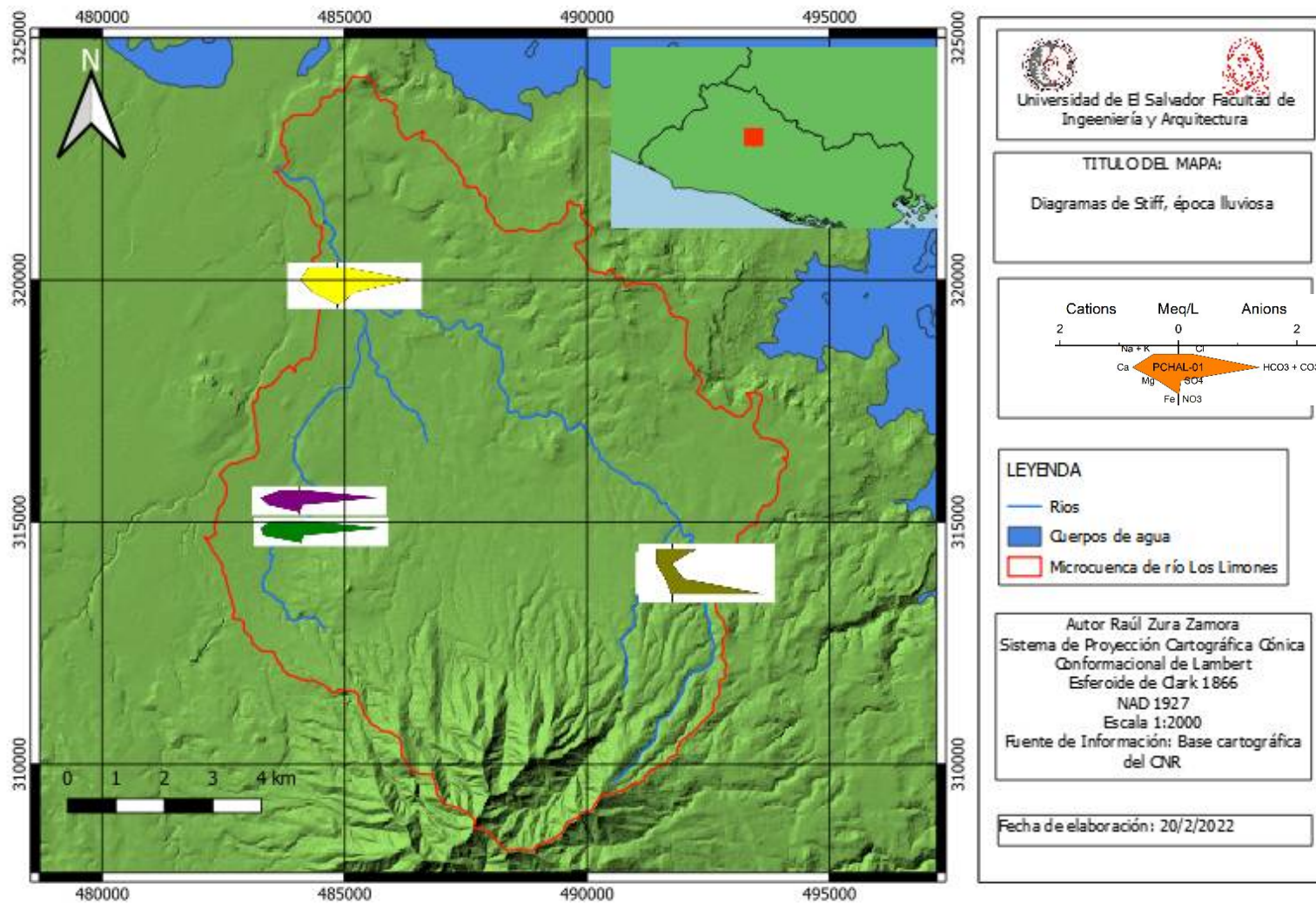
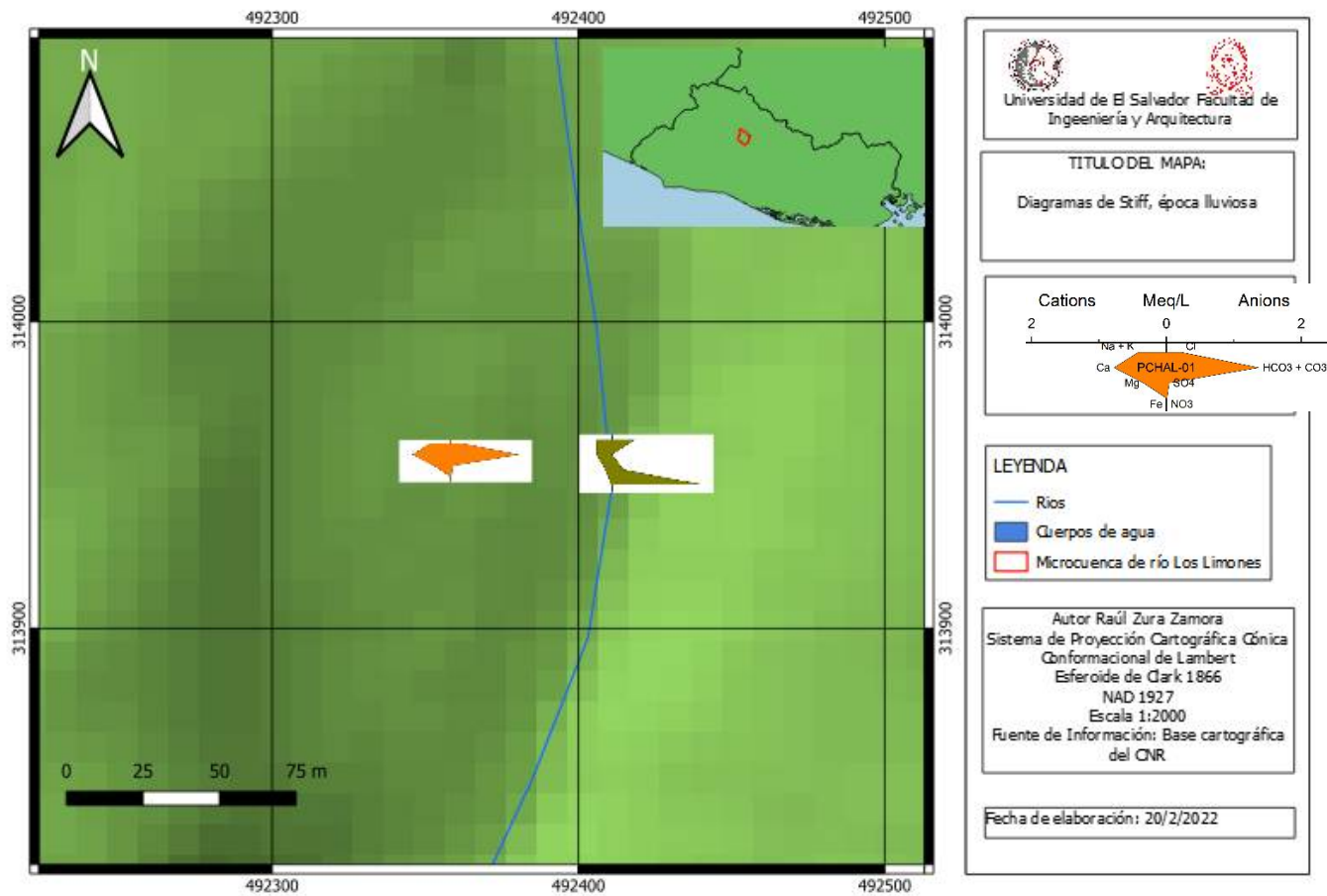


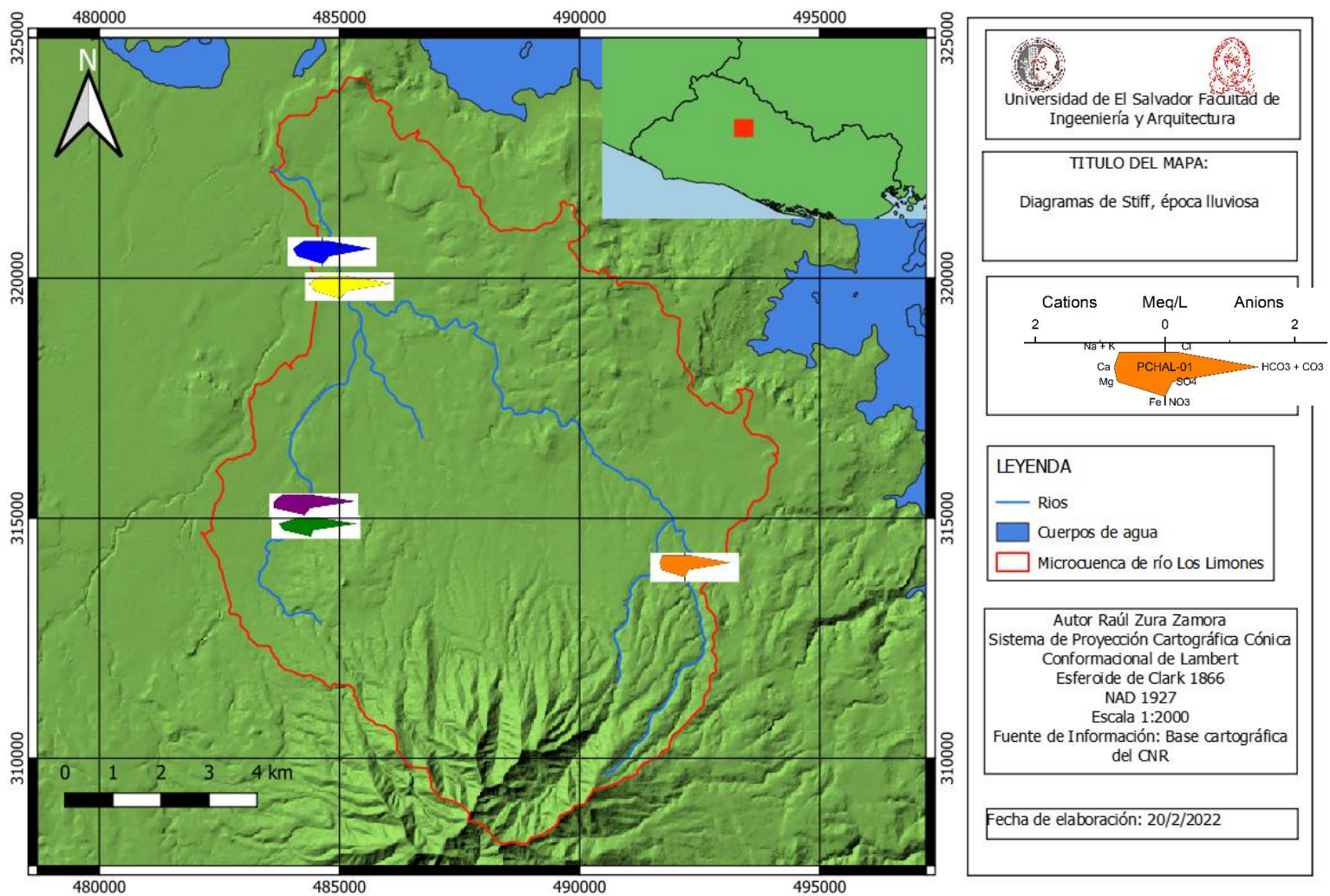
Figura 4.49. Diagramas de Stiff de puntos de muestreo, época seca



Mapa 4.2. Diagramas de Stiff, microcuenca del río Los Limones, época lluviosa



Mapa 4.3. Diagramas de Stiff, microcuenca del río Los Limones, época lluviosa, continuación



Mapa 4.4. Diagramas de Stiff, microcuenca del río Los Limones, época seca

4.4 Interpretación de resultados de los mapas de isolíneas.

El mapa de isolíneas de conductividad para la época seca y la época lluviosa se muestra en el Mapa 4.5. En la época lluviosa, se observa que hay una alta conductividad de hasta 284 $\mu\text{S}/\text{cm}$ alrededor de la junta de agua ARAS (PAPOL-01) y del manantial El Borbollón (MBORBO-01), cantón de San Lucas. La conductividad disminuye progresivamente hacia la cuenca baja con valores de hasta 91 $\mu\text{S}/\text{cm}$, alrededor del río Los Limones, en el cantón Las Delicias. En la época seca, el perfil de conductividad cambia ya que hay valores medios de conductividad extendiéndose hasta la cuenca baja (200 $\mu\text{S}/\text{cm}$), manteniendo la zona ARAS valores altos de hasta 232 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores bajos ocurren en los alrededores de ACRASAME (PCHAL-01 y RCHAL-01) con conductividades de 90-192 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En el mapa de isolíneas de temperatura para la época lluviosa (véase Mapa 4.6) se observa valores de 25.7 a 26.9°C en la cuenca media, mientras que en la cuenca alta y baja las temperaturas se mantienen entre los 24 a 28.5°C. En cambio, durante la época seca, las temperaturas en la cuenca baja se encuentran en los 28.3°C, mientras que en los alrededores de la junta de agua ARAS (PAPOL-01), la temperatura se encuentra en 28.2°C.

Con respecto al porcentaje de oxígeno disuelto en la época lluviosa (véase Mapa 4.7) se observa valores altos en la cuenca media y alta que varían entre 80.9 a 94.8%. En la cuenca media, en la zona del río Los Amates se observa valores bajos de hasta 53.3%. Esto puede deberse a que dicha zona tiene alta carga orgánica que hace disminuir el oxígeno disuelto al ser consumido este como resultado de procesos biológicos. Durante la época seca, los valores altos de oxígeno disuelto se extienden a través de la cuenca media y baja con valores entre 92.3 a 101.8%; mientras que siempre en la zona del manantial El Borbollón ubicado en el río Los Amates, el oxígeno disuelto se encuentra en 70.4%. El mapa de isolíneas de pH de la época lluviosa (véase Mapa 4.8) muestra valores fuera del rango considerado aceptable con valores entre 8.69 a 9.5, según el reglamento técnico salvadoreño 13.02.01:1411, excepto en los manantiales MZAP-01 y MZAP-02, y el río Los Limones con un valor de 8.41. Durante la época seca, los valores de pH varían entre 6.7 a 7.35 para la cuenca media; mientras que para la cuenca baja se alcanzan valores de 6.92 a 6.94, lo cual indica que el pH de las aguas de la cuenca en esta época es aceptable.

¹¹ El rango de validez de pH para agua de consumo humano varía entre 6.0 a 8.5

En el Mapa 4.9, se muestra el mapa de isolíneas de la concentración de sólidos disueltos totales. En la época lluviosa, se observa una alta variación. En ARAS (PAPOL-01) es donde se puede observar valores de 186 mg/l; en cambio en la zona alrededor de ACRASAME (PCHAL-01) se encuentran valores de entre 46 a 96 mg/l; mientras que en la cuenca baja se tiene 57 mg/l.

Para la época seca, la zona alrededor de ARAS exhibe valores de 152 mg/l.

En el Mapa 4.10 se muestran las isolíneas del potencial de óxido-reducción u ORP. Para la época lluviosa, alrededor de ARAS se encuentran 164.2 mV. En la cuenca baja se llegan a valores entre 117.7 mV. Para la época seca, en toda la cuenca se observan valores entre 104.2 a 155.2 mV.

Para el Mapa 4.11, se muestran las isolíneas de concentración de calcio. En la época lluviosa, se obtuvo un valor alto de 24.8 mg/l en ARAS, mientras que en ACRASAME se tiene un valor entre 4.65 y 15.54 mg/l. En la época seca, el valor de la concentración de calcio es de 22.33 mg/l en ARAS y en ACRASAME se encuentra un valor de 15.74 mg/l.

En el Mapa 4.12, las isolíneas de concentración de magnesio para la época lluviosa presentan un valor relativamente alto de 13.9 en ARAS, mientras que cerca de ACRASAME se observan valores de 1.19 a 4.14 mg/l. En la época seca, cerca del río Los Amates hay concentraciones de magnesio de 12.25 mg/l, mientras que cerca de ACRASAME se observan valores de 8.93 mg/l.

En el Mapa 4.13 se muestran el mapa de isolíneas de concentración de sodio. Para la época lluviosa, cerca del río Los Amates se observa un valor de 12.85 mg/l; mientras que en ACRASAME se obtuvieron valores de 3.53 y 6.45 mg/l. En la época seca, para la cuenca media se tiene un valor de 5.2 mg/l, y se observan valores de 6.75 a 6.9 en la cuenca baja.

En el Mapa 4.14, se observa las isolíneas de concentración de potasio. Para la época lluviosa, se observa un valor de 3.23 mg/l en la cuenca media mientras que cerca del río Los Amates se tienen valores de 3.63 mg/l. En la época seca, se encuentra un valor de 7.3 mg/l en ARAS ubicado en la cuenca media y de 9.35 a 10.35 mg/l en la cuenca baja.

Para el Mapa 4.15, se muestra las isolíneas de concentración de sulfatos. En la época lluviosa se observa un valor de 15.42 mg/l en la cuenca baja; mientras que en la cuenca media se da un valor de 4.62 mg/l. En la época seca, se observa el mismo patrón: valores altos de 9.81 y 10.47 mg/l en la cuenca baja. Se observa que los valores de concentración de sulfatos cumplen con el límite estipulado en el reglamento técnico 13.02.01:14 de 250 mg/l.

En el Mapa 4.16, se muestran las isolíneas de concentración para el ion fosfato. En la época lluviosa, se tienen valores de 0.44 a 0.45 mg/l en la cuenca baja y media. En la época seca se dan valores entre 0.46 a 0.5 mg/l en la cuenca baja; mientras que en la cuenca media se tienen valores de 0.34 a 0.42 mg/l.

En el Mapa 4.17 se muestra las isolíneas de concentración del ion Nitrato. Para la época lluviosa, se observan valores de 0.34 a 2.8 mg/l en la cuenca baja y media. En la época seca, hay una menor concentración de nitratos en toda la microcuenca con valores de que van desde 0 a 1.11 mg/l en la cuenca baja y media. Es de observar que los valores correspondientes a la época lluviosa¹² y a la época seca están dentro de los límites dados en la norma.

El Mapa 4.18 muestra las isolíneas de concentración del ion Bicarbonato/Carbonato. Para la época lluviosa la microcuenca exhibe valores de 82.96 a 154.51 mg/l en la cuenca baja y media. En la época seca se observan valores que van de 100.23 a 104.5 mg/l alrededor de ARAS y el río Los Amates.

En el Mapa 4.19 se muestra las isolíneas de concentración de cloruro para la época lluviosa y seca. Para la época lluviosa, se observan valores de 8.22 a 12.34 en ACRASAME y de 5.67 en ARAS, MBORBO-01 y RLIM-01. Para la época seca, los valores máximos se observan en ARAS con un valor de 8.74 mg/l (cuenca media) y para la cuenca baja se encuentran valores de 5.24 a 6.99 mg/l. Finalmente se debe mencionar que contar con más sitios de toma de parámetros fisicoquímicos puede brindar una imagen más cercana a la realidad cuando se observan este tipo de gráficas de isolíneas.

4.5 Resumen del capítulo

Sobre la normalidad de las series de datos, se tiene que la temperatura, el pH, el ORP, la concentración de calcio, de sodio y de potasio si muestran un comportamiento normal en ambas épocas, comprobable por el diagrama de probabilidad normal. Mientras que el DO%, concentración de cloruro, sulfato y de nitrato no muestran comportamiento de distribución normal en ambas épocas. Ahora bien, la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales y la concentración de magnesio únicamente muestran un comportamiento normal en la estación lluviosa.

La concentración de bicarbonato/carbonato y de fosfato únicamente muestran un comportamiento normal durante la estación seca

En la época lluviosa, cuatro muestras eran del tipo bicarbonatada cálcica o bicarbonatada cálcica magnésica. Los diagramas de Stiff revelan que las aguas están poco concentradas en la cuenca media a la altura de ACRASAME, pero si están concentradas en carbonatos alrededor de ARAS. La concentración disminuye en la cuenca baja en el río Los Limones.

¹² A excepción de la muestra obtenida en RCHAL-01 que tenía un valor de 82.81 mg/l.

En la época seca, las muestras son del tipo bicarbonatada magnésica cálcica o bicarbonatada cálcica magnésica. Los diagramas de Stiff para esta época son bastante similares entre sí y guardan gran semejanza con el diagrama para el punto PCHAL-01 de la época lluviosa.

Sobre los mapas de isóneas se puede mencionar lo siguiente: La conductividad en ambas épocas es alta cerca de ARAS (284 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mientras que cerca de ACRASAME, la conductividad se mantiene con valores bajos (70 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

La temperatura se mantiene con valores que van de 26.1 a 28.9°C en la mayoría de la cuenca.

Con respecto al DO% la cuenca experimenta valores altos en la cuenca alta y media (80.9-94.8%) en la época lluviosa; para la época seca, el comportamiento se revierte con valores de 92.3 a 101.8% en la cuenca baja.

Los valores de pH en la estación lluviosa tienen valores aceptables según el reglamento técnico salvadoreño 13.02.01:14 excepto en el nacimiento del río Chalchigüe donde se presentan valores de 8.7 y 9.5. Para la estación seca, las aguas de la microcuenca el pH varía en un rango aceptable de 6.7 a 7.35.

Los sólidos disueltos totales o TDS varían fuertemente en la estación lluviosa con valores máximos de 186 mg/l en ARAS (PAPOL-01) y valores mínimos de 57 mg/l en la cuenca baja. En la época seca, el oeste de la cuenca presenta valores de 152 mg/l mientras que en la parte este se encuentran valores menores de 63 - 125 mg/l.

El potencial de óxido reducción en la estación lluviosa en la cuenca media y baja muestra valores de 109.27-164.6 mV, mientras que en la cuenca alta hay valores de 117.7 mV. En la estación seca, toda la cuenca muestra valores entre 104.2 a 155.2 mV.

Con respecto a la concentración de calcio en ambas épocas se encuentran valores entre 4.65 y 24.8 mg/l para la época lluviosa y 15.74 y 22.33 mg/l para la época seca).

Para el magnesio, en la época lluviosa se pueden encontrar concentraciones de entre 1.19 y 13.9 mg/l; mientras que, en la época seca, se encuentran valores de 8.93 a 12.25 mg/l. Para ambas épocas los valores máximos se encuentran ubicados en la cercanía de ARAS.

La concentración de sodio se encuentra entre 3.53 y 18.9 mg/l para la mayor parte de la cuenca en la época lluviosa, mientras que, en la época seca, la concentración varía entre 5.2 y 9.75 mg/l. El comportamiento es diferente en las dos épocas porque mientras que los valores máximos se concentran en ARAS para la estación lluviosa, estos valores máximos se encuentran cerca de ACRASAME para la época seca.

Las isóneas de concentración del potasio se mantienen entre 3.03 a 5.35 mg/l en la estación lluviosa y entre 8.93 y 12.25 en la estación seca.

Para el sulfato se observa un patrón similar en ambas épocas: los mayores valores se encuentran en la cuenca baja (15.42 mg/l, época lluviosa; 9.81 a 10.47, época seca), mientras que los valores mínimos se encuentran en la cuenca media (2.05 a 8.39 mg/l, época lluviosa; 5.5 a 9.21 mg/l, época seca).

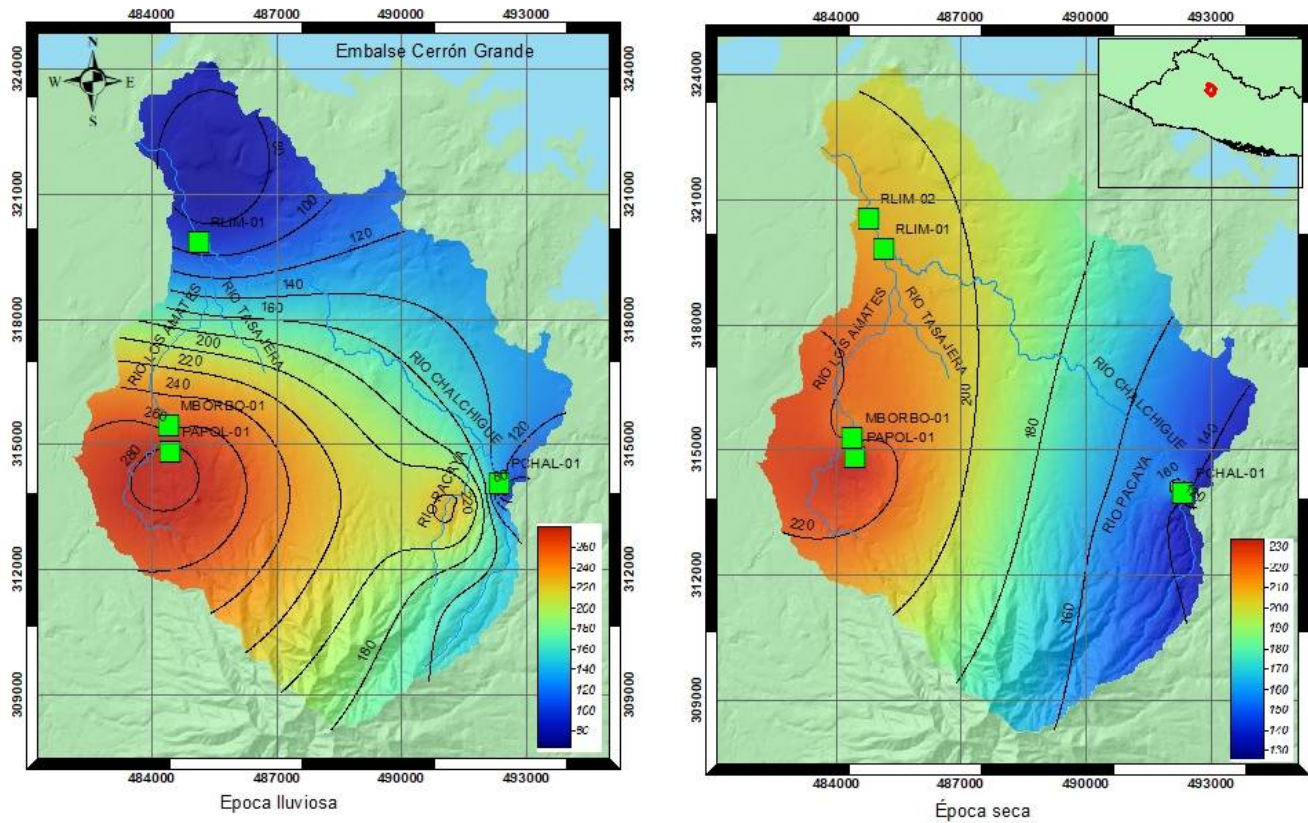
El gráfico de isolíneas del fosfato revela concentraciones menores a 1 mg/l en ambas épocas.





Para el ion nitrato, tanto en época lluviosa como seca se observan valores menores a 50 mg/l ¹³ y cumplen con el valor dado en el reglamento técnico salvadoreño Agua. Agua de consumo humano, requisitos de calidad e inocuidad.

Para el anión Bicarbonato/Carbonato se tienen valores que van de los 82.96 a 154.51 mg/l para la época lluviosa y de 87.43 a 104.5 mg/l para la época seca.

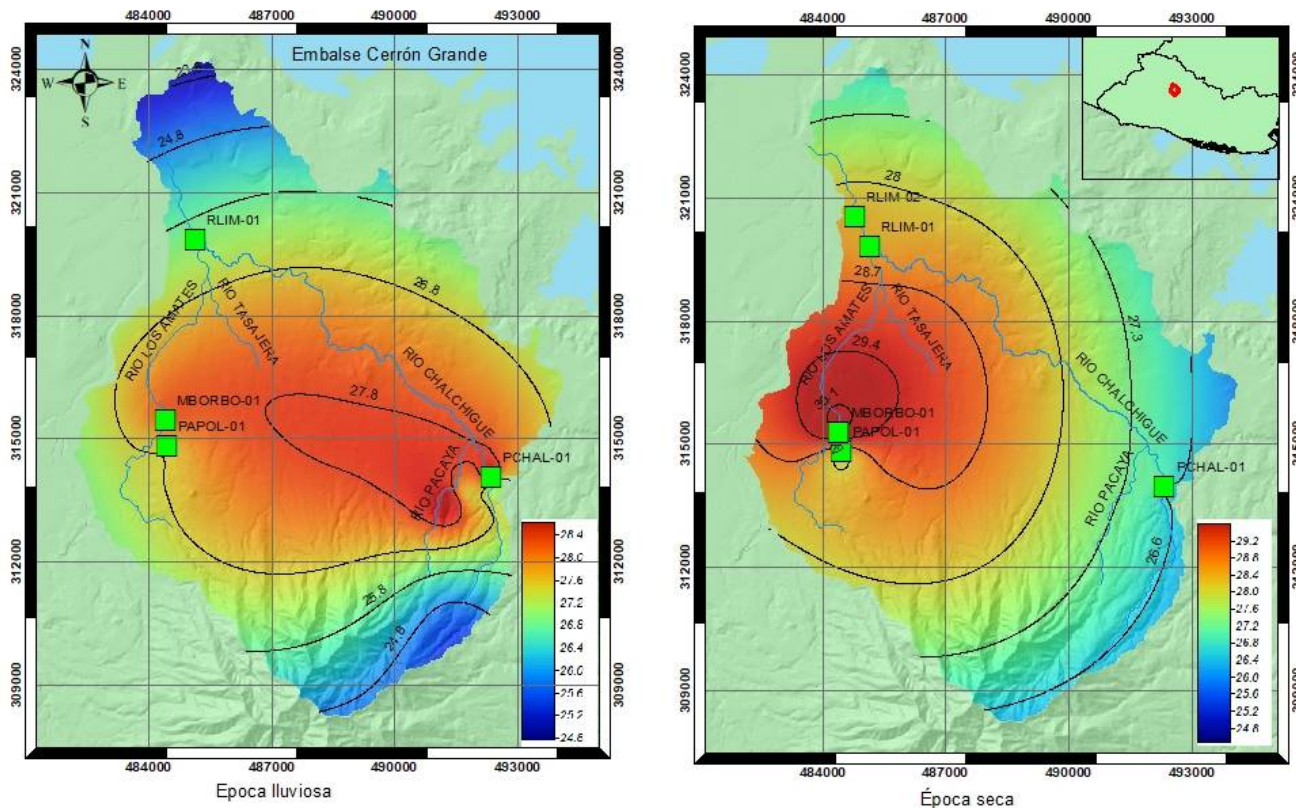
Los valores de concentración del ion cloruro se mantuvieron entre 5.24 y 12.34 mg/l para ambas épocas.

¹³ A excepción de la muestra obtenida en PCHAL-01 en la que se obtuvo un valor de 82.81 mg/l.



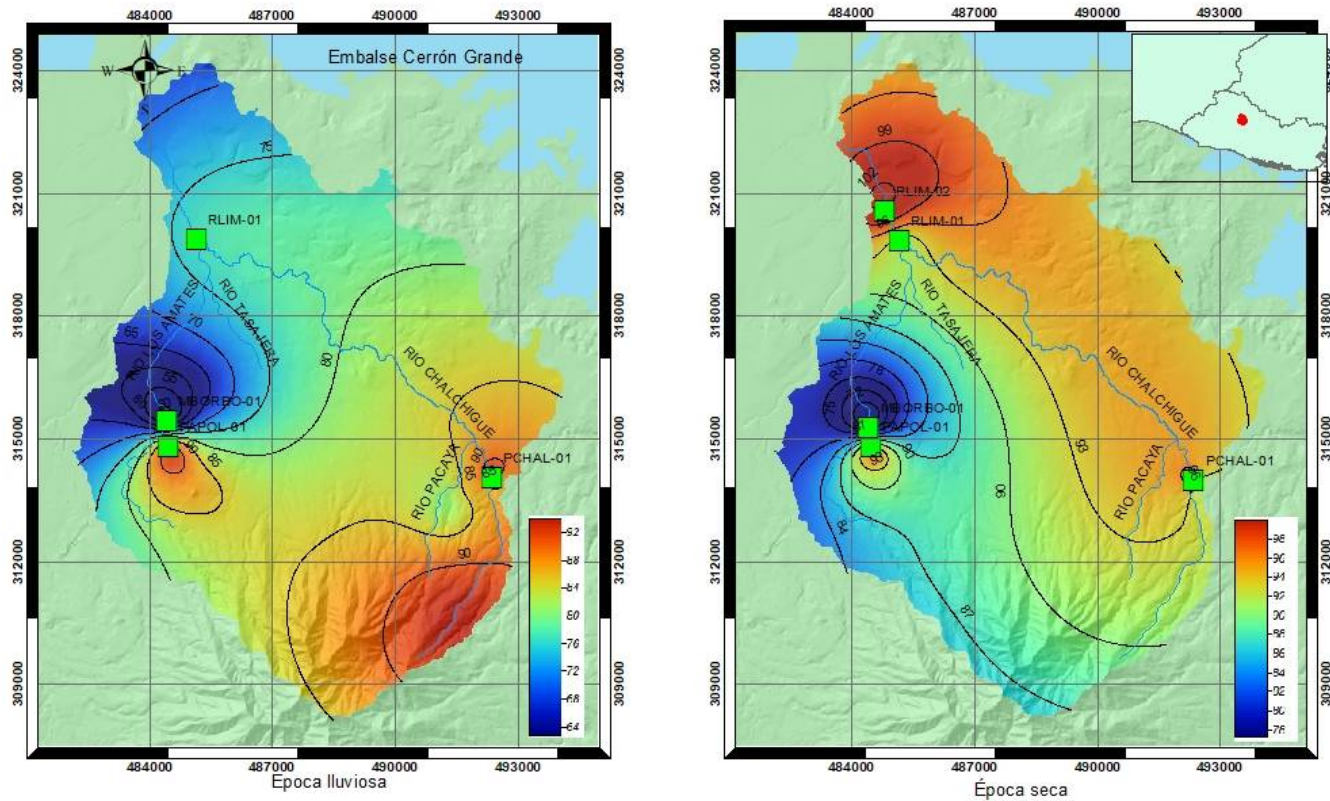
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA 0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{S}/\text{cm}$), EPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora Fecha de elaboración: 27/01/2022</p>	<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none">  Isolíneas de conductividad  Cuerpos de agua  Ubicación de puntos de muestreo
---	--	--	---

Mapa 4.5. Isolíneas de conductividad, épocas lluviosa y seca



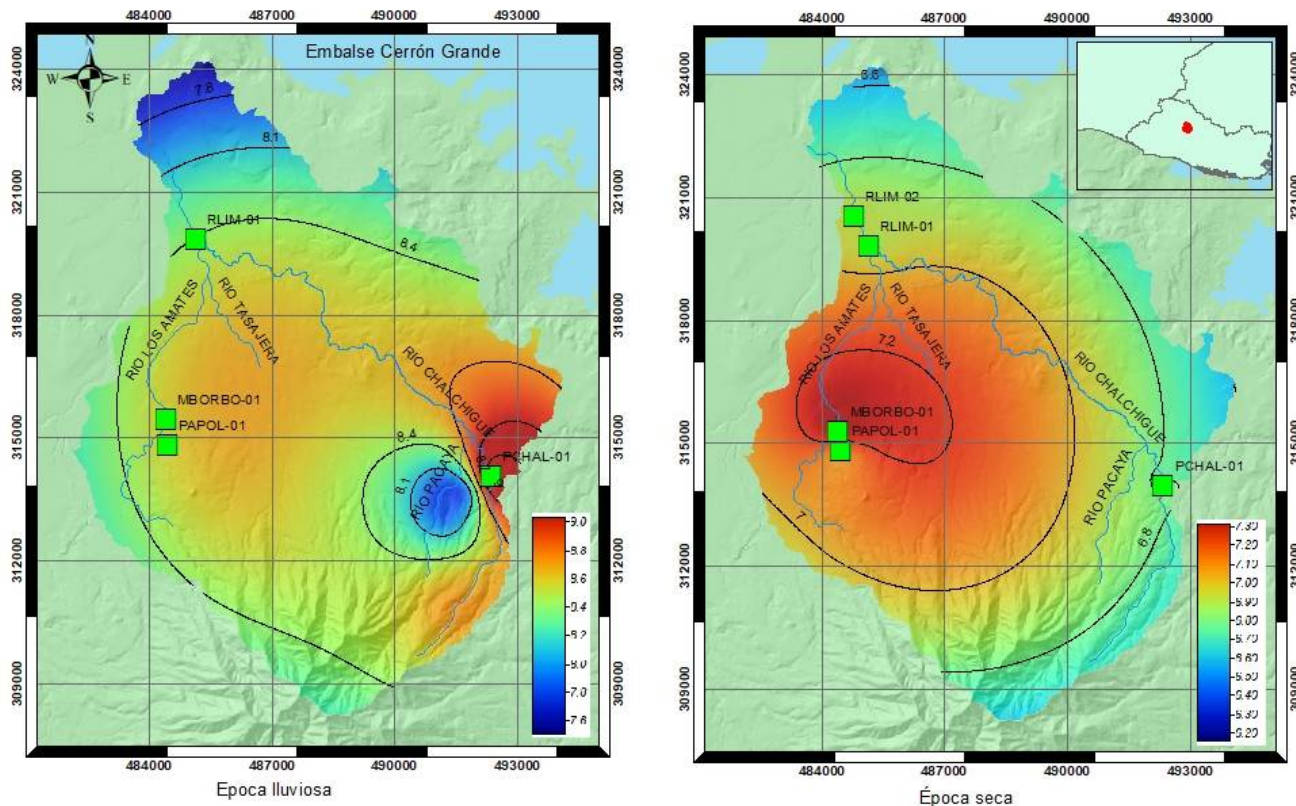
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA 0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE TEMPERATURA (°C), ÉPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora Fecha de elaboración: 27/01/2022</p>	<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> — Isolíneas de temperatura ■ Cuerpos de agua ■ Ubicacion de puntos de muestreo
---	--	--	---


Mapa 4.6. Isolíneas de temperatura, épocas lluviosa y seca



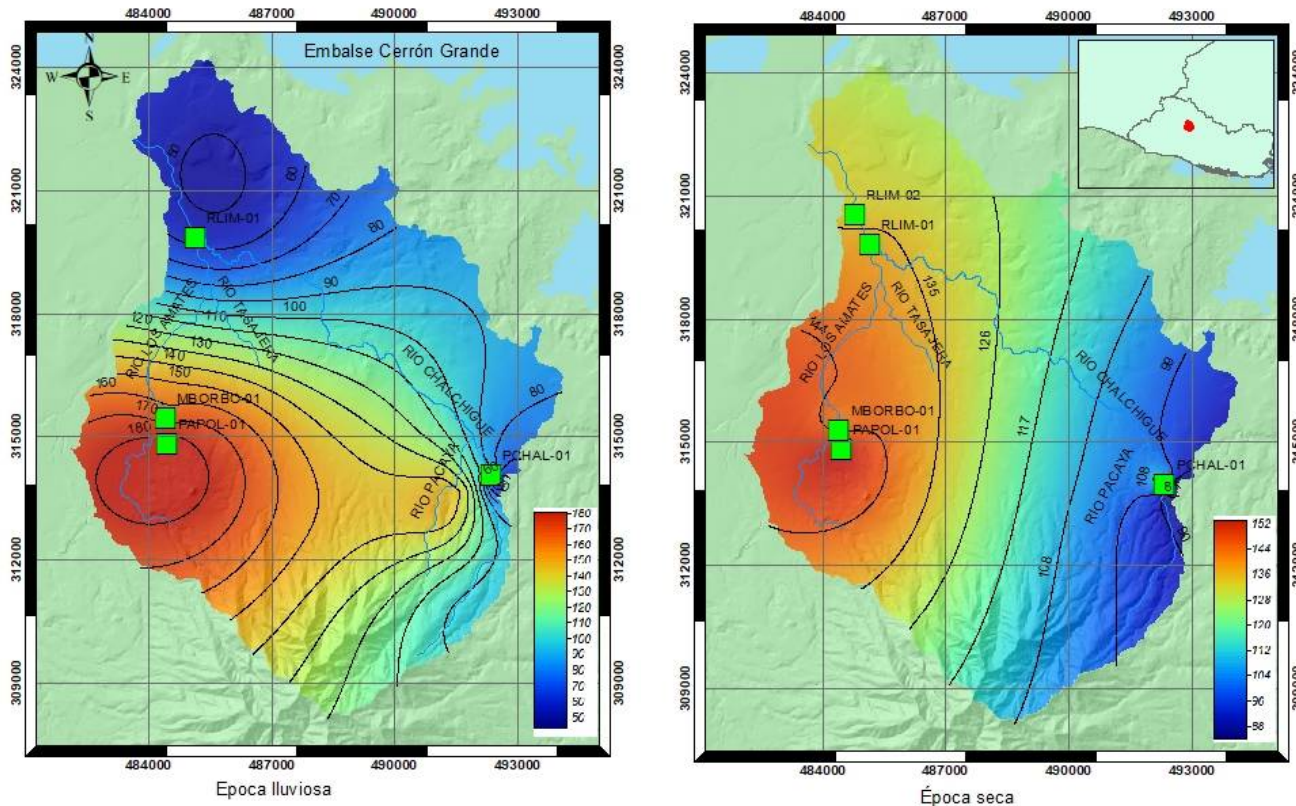
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT</p> <p>ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA</p>  <p>0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE OXÍGENO DISUELT (%), ÉPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora Fecha de elaboración: 27/01/2022</p>	<p>Escala de publicación: 1:125 000</p> <p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> — Isolíneas de concentración de oxígeno disuelto % ■ Cuerpos de agua ■ Ubicacion de puntos de muestreo
---	---	---	--

Mapa 4.7. Isolíneas de concentración de oxígeno disuelto (%), épocas lluviosa y seca.



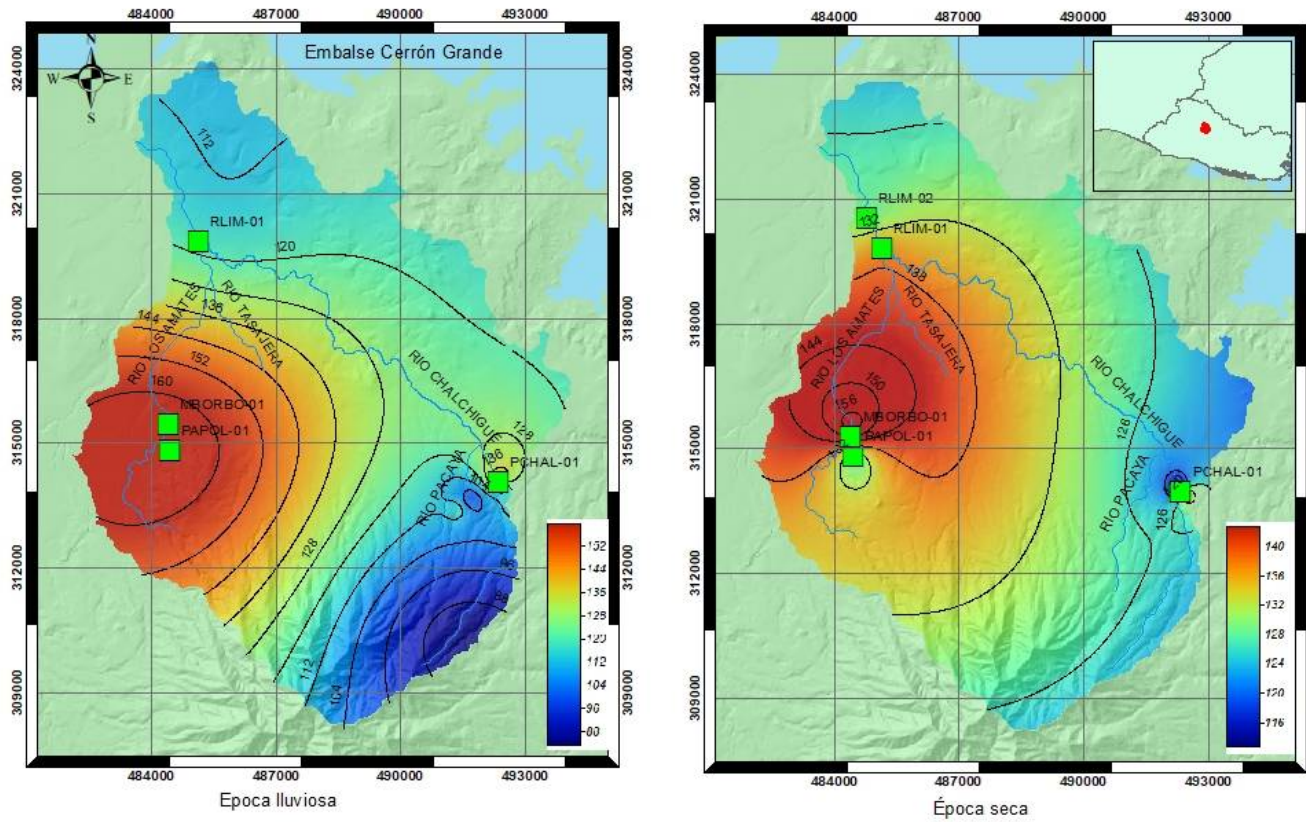
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT</p> <p>ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA</p>  <p>0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE pH, ÉPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora Fecha de elaboración: 27/01/2022</p>	<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none">  Isolneas de pH  Cuerpos de agua  Ubicación de puntos de muestreo
---	---	--	---

Mapa 4.8. Isolíneas de pH, épocas lluviosa y seca



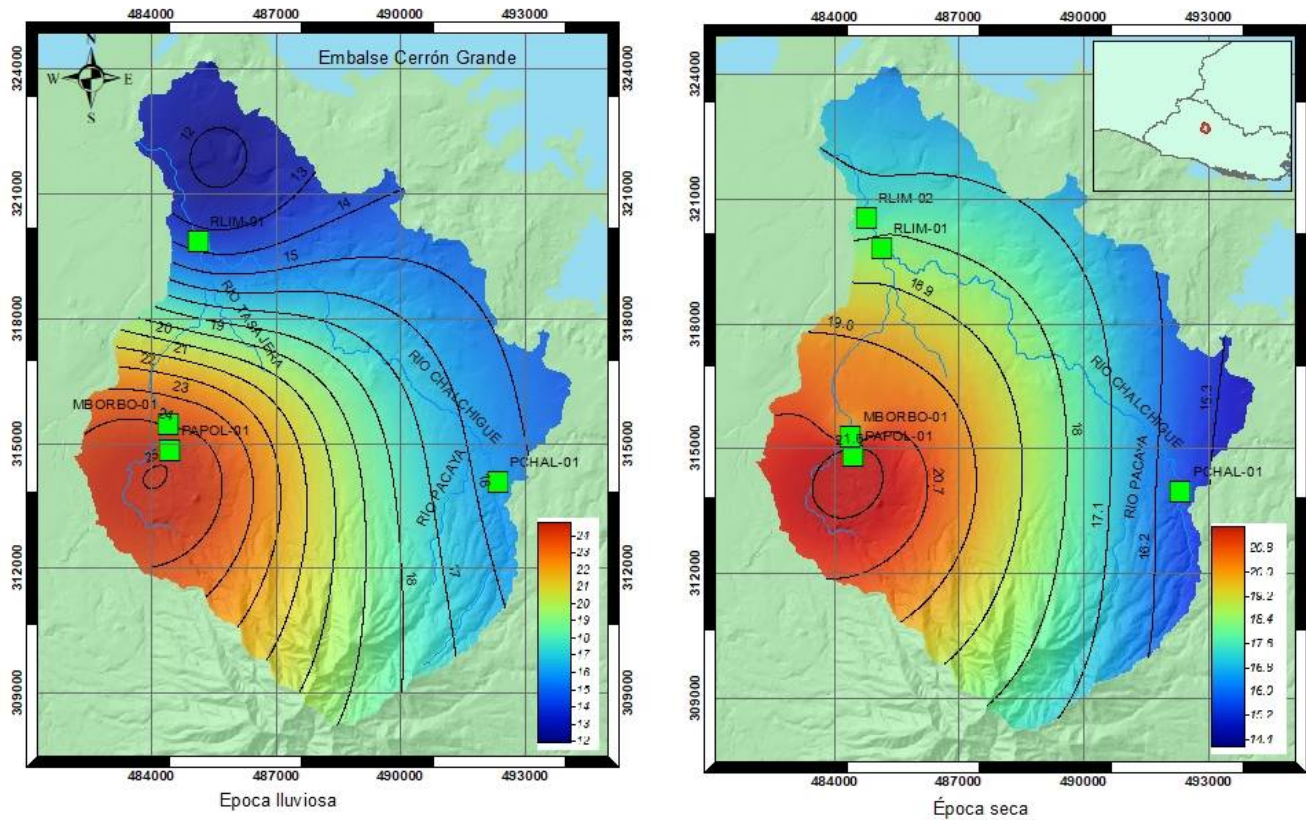
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT</p> <p>ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA</p>  <p>0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE TDS (mg/l), ÉPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora Fecha de elaboración: 27/01/2022</p> <p>Escala de publicación: 1:125000</p>	<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> — Isolíneas de concentración de sólidos disueltos totales — Cuerpos de agua ■ Ubicación de puntos de muestreo
---	---	---	--

Mapa 4.9. Isolíneas de concentración de TDS, época lluviosa y seca



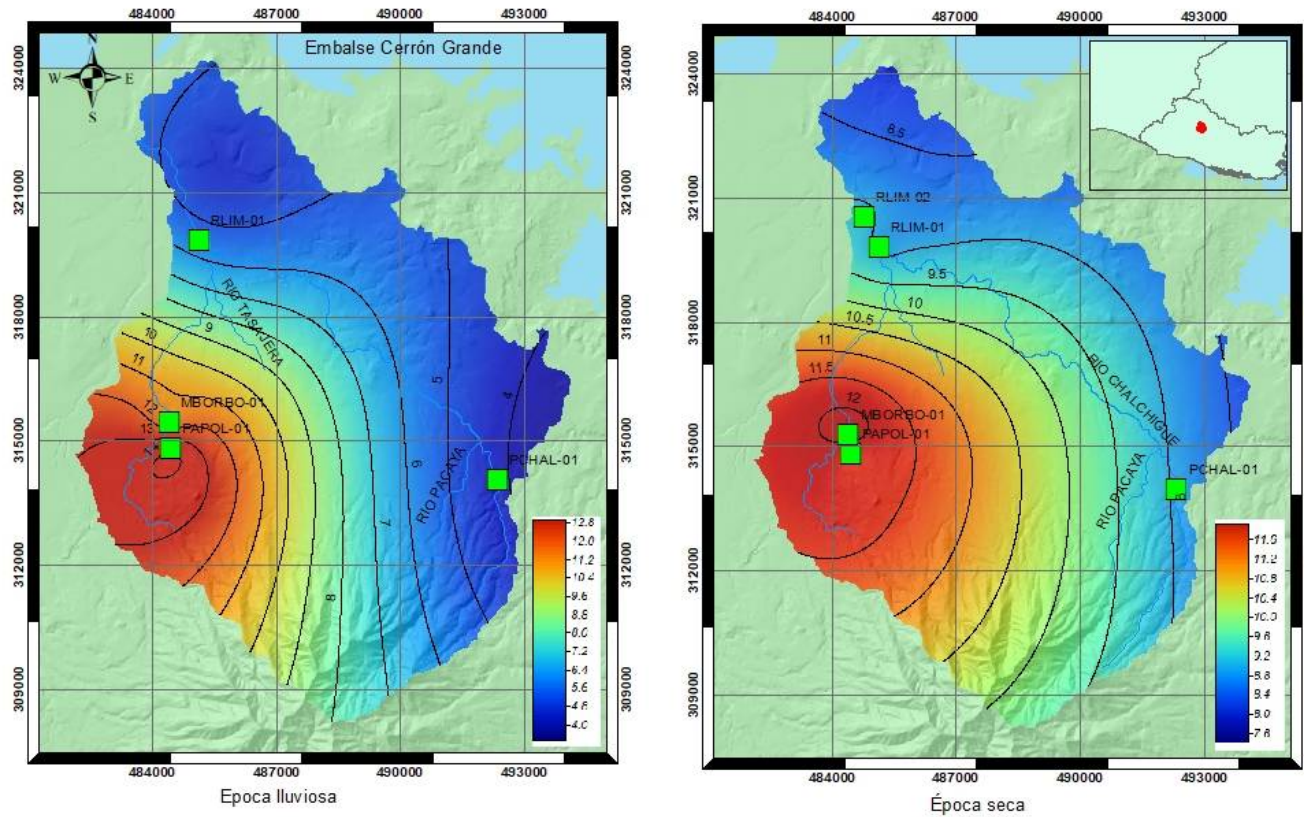
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT</p> <p>ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA</p>  <p>0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS ORP (mV), ÉPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora</p> <p>Fecha de elaboración: 27/01/2022</p> <p>Escala de publicación: 1:125000</p>	<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none">  Isolíneas de ORP  Cuerpos de agua  Ubicación de puntos de muestreo
---	---	---	---

Mapa 4.10. Isolíneas de ORP, época lluviosa y seca



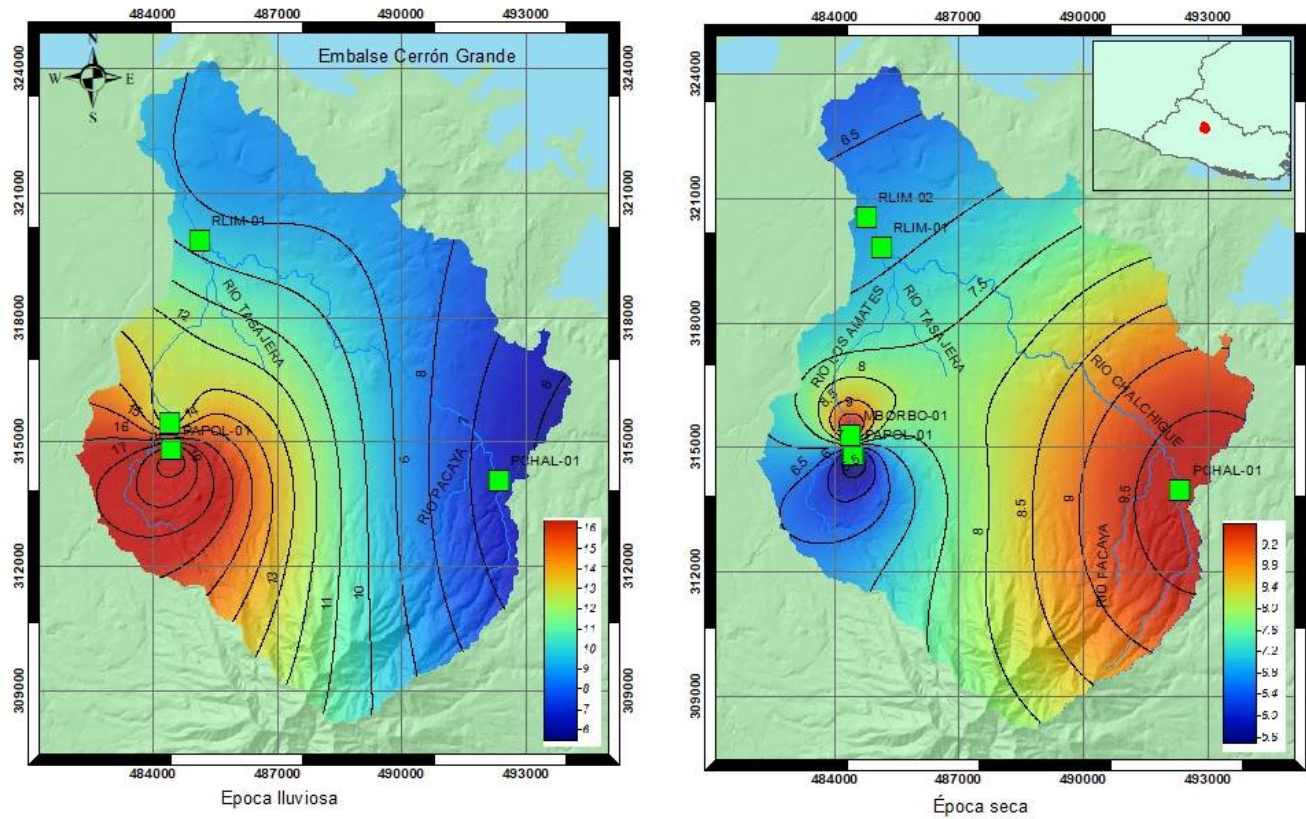
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA</p>  <p>0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE CALCIO (mg/l), ÉPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora Fecha de elaboración: 27/01/2022</p> <p>Escala de publicación: 1:125000</p>	<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none">  Isolíneas de concentración de calcio  Cuerpos de agua  Ubicación de puntos de muestreo
---	--	--	---

Mapa 4.11. Isolíneas de concentración de ion Calcio, época lluviosa y seca



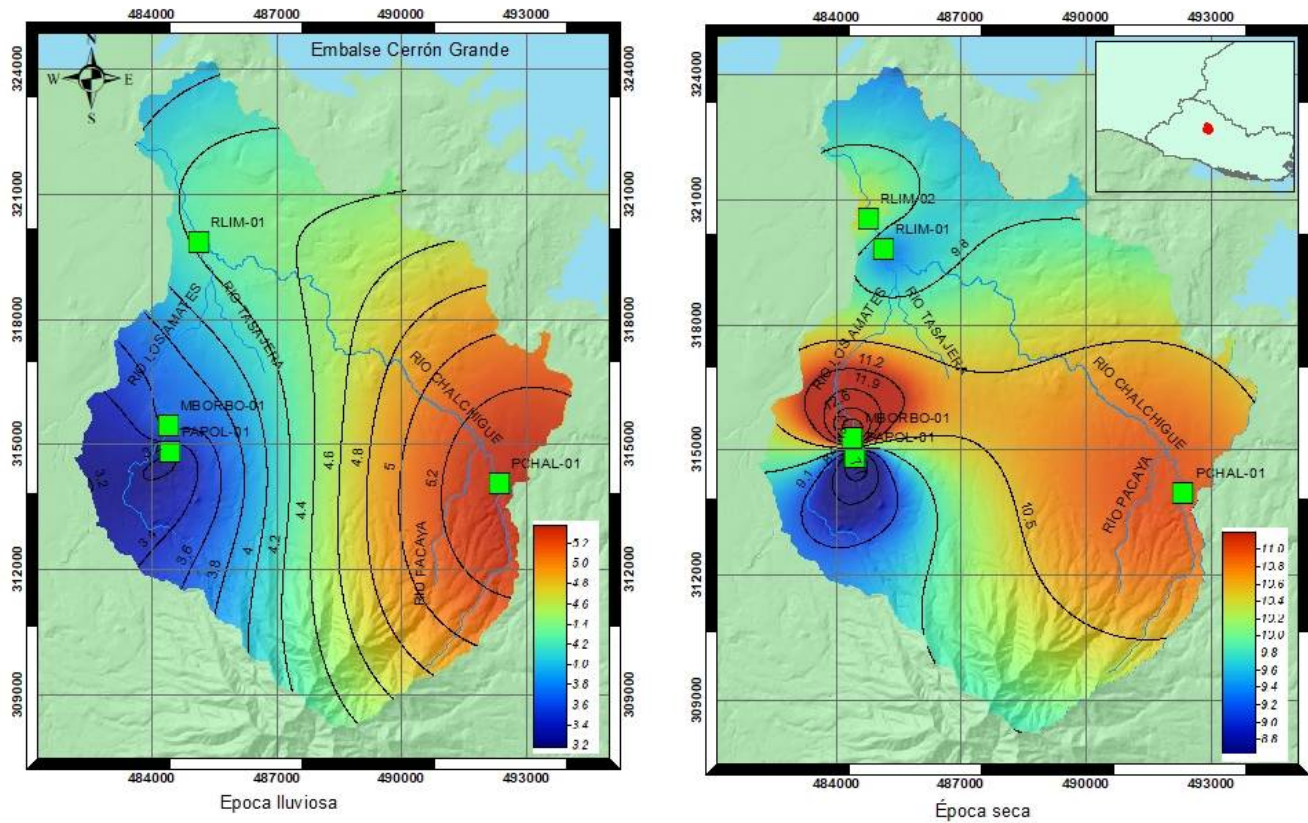
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT</p> <p>ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA</p>  <p>0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE MAGNESIO (mg/l), EPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora</p> <p>Fecha de elaboración: 27/01/2022</p> <p>Escala de publicación: 1:125000</p>	<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> — Isolíneas de concentración de magnesio ■ Cuerpos de agua ■ Ubicación de puntos de muestreo
---	---	---	---



Mapa 4.12. Isolíneas de concentración de ion Magnesio, época lluviosa y seca



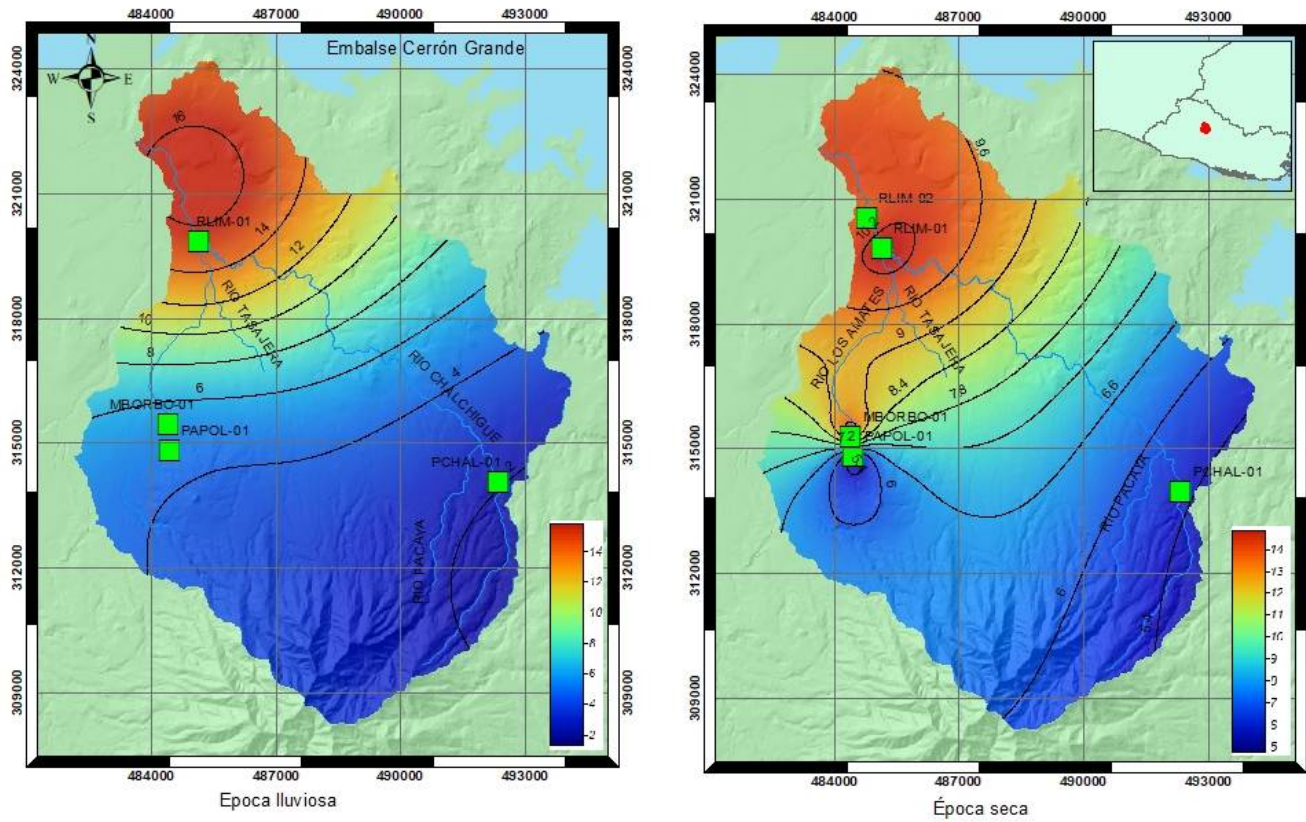
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT</p> <p>ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA</p>  <p>0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE SODIO (mg/l), EPOCALLUVIOSAY SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora</p> <p>Fecha de elaboración: 27/01/2022</p> <p>Escala de publicación: 1:125000</p>	<p>LEYENDA</p> <p>isolíneas de concentración de sodio</p> <p> Cuerpos de agua</p> <p> Ubicación de puntos de muestreo</p>
---	---	--	---

Mapa 4.13. Isolíneas de concentración de ion Sodio, época lluviosa y seca



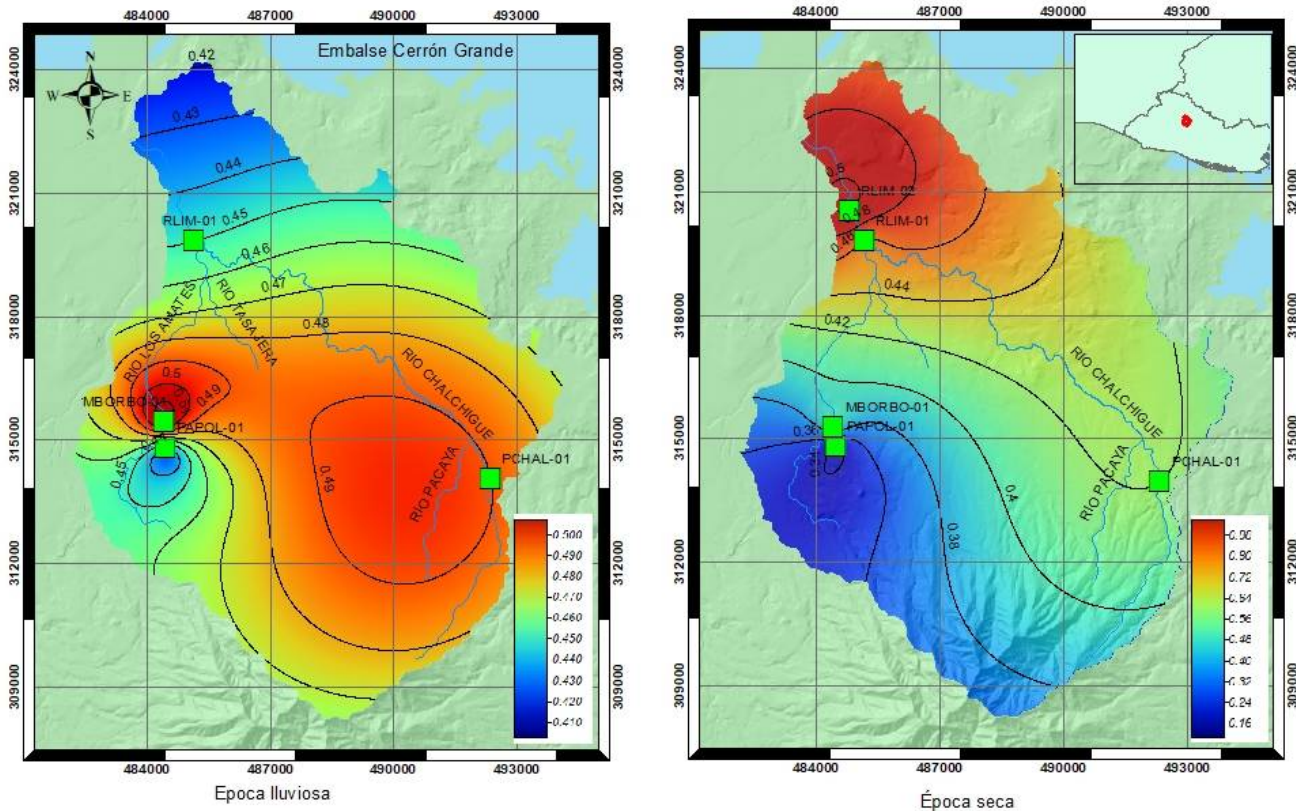
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT</p> <p>ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA</p>  <p>0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE POTASIO (mg/l), EPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora Fecha de elaboración: 27/01/2022</p> <p>Escala de publicación: 1:125000</p>	<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> Isolíneas de concentración de potasio Cuerpos de agua Ubicación de puntos de muestreo
---	---	---	--

Mapa 4.14. Isolíneas de concentración de ion Potasio, época lluviosa y seca



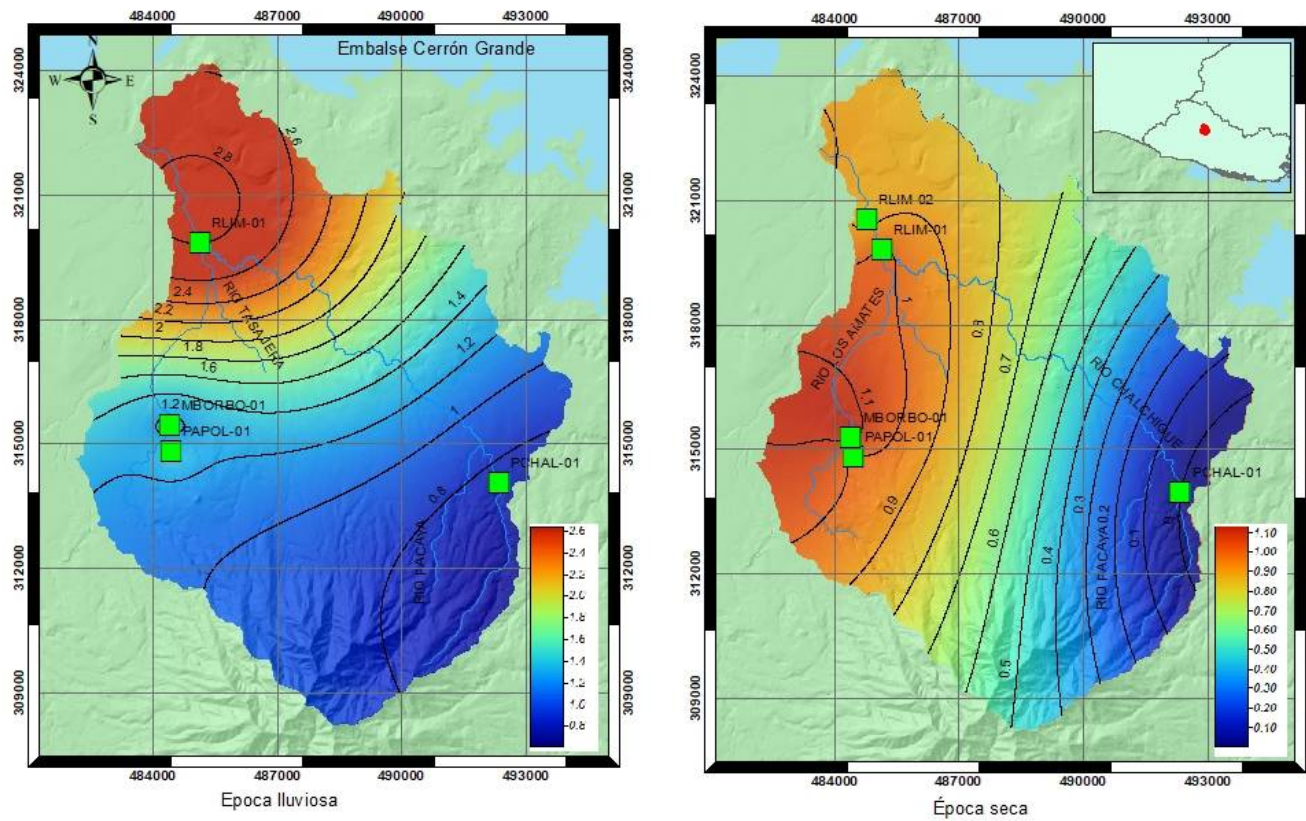
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA 0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE SULFATO (mg/l), EPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora Fecha de elaboración: 27/01/2022</p> <p>Escala de publicación: 1:125000</p>	<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> — Isolíneas de concentración de sulfato ■ Cuerpos de agua ■ Ubicación de puntos de muestreo
---	--	---	--

Mapa 4.15. Isolíneas de concentración de ion Sulfato, época lluviosa y seca



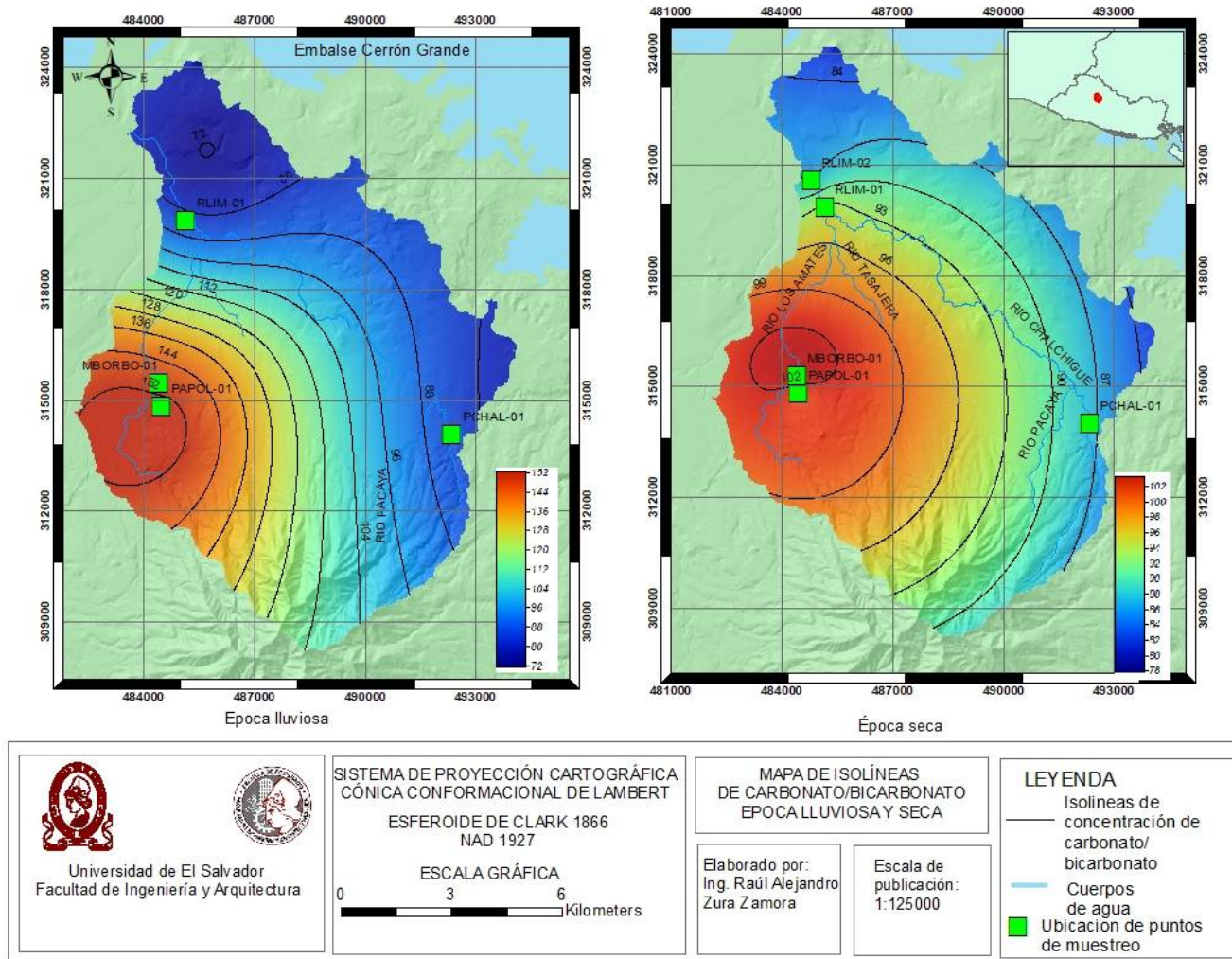
 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT</p> <p>ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA</p>  <p>0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE FOSFATO (mg/l), ÉPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora</p> <p>Fecha de elaboración: 27/01/2022</p>	<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> — Isolíneas de concentración de fosfato ■ Cuerpos de agua ■ Ubicación de juntas de agua seleccionadas
---	---	---	--

Mapa 4.16. Isolíneas de concentración de ion Fosfato, época lluviosa y seca

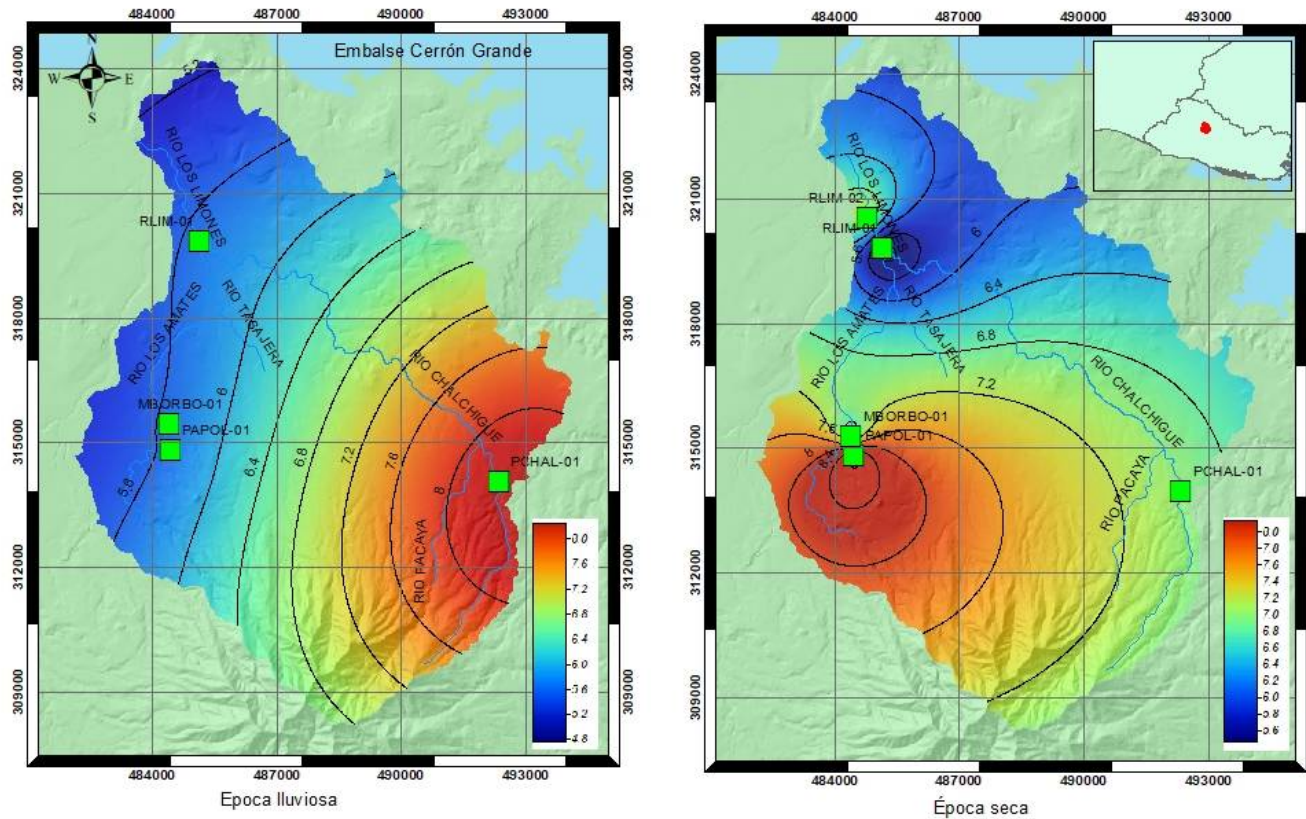


 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA 0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE NITRATO (mg/l), EPOCALLUVIOSAY SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora Fecha de elaboración: 27/01/2022</p> <p>Escala de publicación: 1:125000</p>	<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> — Isolinéas de concentración de nitrato ■ Cuerpos de agua ■ Ubicación de puntos de muestreo
---	--	---	--

Mapa 4.17. Isolíneas de concentración de ion Nitrato, época lluviosa y seca



Mapa 4.18. Isolíneas de concentración de ion Bicarbonato/Carbonato, época lluviosa y seca



 <p>Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura</p>	<p>SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA CÓNICA CONFORMACIONAL DE LAMBERT ESFEROIDE DE CLARK 1866 NAD 1927</p> <p>ESCALA GRÁFICA 0 3 6 Kilometers</p>	<p>MAPA DE ISOLÍNEAS DE CLORURO, ÉPOCA LLUVIOSA Y SECA</p> <p>Elaborado por: Ing. Raúl Alejandro Zura Zamora</p> <p>Escala de publicación: 1:125 000</p>	<p>LEYENDA</p> <p>Isolinias de concentración de cloruro</p> <p> Cuerpos de agua</p> <p> Ubicación de puntos de muestreo</p>
---	--	--	---

Mapa 4.19. Isolíneas de concentración de ion Cloruro, época lluviosa y seca

Como primera conclusión, se puede mencionar que el tipo de geología más importante, en cuanto a presencia, son las andesitas superiores formadas por coladas y andesitas basálticas, con un 34.908%; las lavas del volcán escudo Guazapa con 18.914% y los depósitos poligenéticos de depresiones, con un 14.535%. Los primeros dos tipos son roca ígnea y el último tipo es roca sedimentaria. Según esto, la presencia de minerales en las aguas de la microcuenca está muy relacionado con rocas de tipo ígneas pero dado la baja velocidad con que estas rocas se descomponen (véase pág. 28), hay que considerar que los minerales en rocas sedimentarias tienen en realidad más presencia en las aguas de la microcuenca.

Las series de datos que siguen el comportamiento de una distribución normal en ambas épocas (temperatura, pH, el ORP y las concentraciones de sodio, de potasio y de fosfato) pueden utilizarse en pruebas de hipótesis paramétricas tal como la prueba t de dos muestras o la prueba ANOVA para más de 2 muestras. Para el DO%, las concentraciones de cloruros, sulfato y nitrato, que no muestran comportamiento normal en ambas épocas, será necesario utilizar pruebas no paramétricas tal como la prueba de suma de rangos, para realizar contrastes válidos de hipótesis. En el caso de la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales, las concentraciones de calcio, magnesio y de bicarbonato/carbonato, será necesario utilizar un enfoque mixto con uso de pruebas paramétricas y no paramétricas. Es importante mencionar que, de las variables hidrogeoquímicas mencionadas en este trabajo, el reglamento técnico salvadoreño a tomar en cuenta para la prueba de hipótesis (RTS.13.02.01:14) considera únicamente a la concentración de nitratos, el pH, las concentraciones de sólidos disueltos totales y de sulfatos.

En la época lluviosa, de los cinco puntos de muestreo, sólo en uno, RCHAL-01, se obtuvo un porcentaje de error de balance eléctrico mayor a 10%¹⁴ para conductividades entre 70 y 290 $\mu\text{S}/\text{cm}$; los valores de concentraciones de iones mayoritarios obtenidos para dicho punto de muestreo no se ocuparon en la elaboración de diagramas de isolíneas y de boxplot y de gráficos de líneas, porque distorsionaban bastante las gráficas mencionadas. Por lo tanto, los resultados obtenidos en los puntos de muestreo, a excepción de RCHAL-01, reflejan buenos resultados de laboratorio. Para la época seca, se obtuvieron porcentajes de error entre 6.21% y 12.62% para conductividades entre 90 y 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esto indica que es necesario revisar y validar ya sea procedimientos de laboratorio y/o de muestreo. Además, se debe considerar la realización de la prueba de alcalinidad in-situ dado que las

¹⁴ Se obtuvo en dicho sitio de muestreo, un porcentaje de error de balance eléctrico del 53%

condiciones fisicoquímicas de la muestra cambian bastante entre el momento de toma de muestra al de análisis de esta.

En cuanto a la clasificación de las aguas de la microcuenca del río Los Limones, en la época lluviosa 3 puntos de muestreo están dentro de la categoría Bicarbonatada cálcica magnésica, 1 punto de muestreo cae dentro de la categoría bicarbonatada cálcica y 1 un sitio de muestreo tiene clasificación de nitrada cálcica sódica. En la época seca, el comportamiento de las aguas varía entre bicarbonatada cálcica magnésica (cuatro muestras) y bicarbonatada magnésica cálcica (1 muestra). Estos resultados indican una alta presencia de calcio, magnesio y carbonato en las formaciones geológicas de la zona. El rango de variación del perfil de isolíneas de conductividad es mayor durante la época lluviosa que durante la época seca, lo que indicaría una mayor cantidad de minerales conductivos a lo largo de la cuenca durante la primera época.

De los parámetros fisicoquímicos y iones mayoritarios contemplados en el reglamento técnico salvadoreño 13.02.01:14 puede mencionarse que la concentración de nitratos, sulfatos y sólidos disueltos totales cumplían con los límites máximos permisibles dados en dicho reglamento para ambas épocas. Con respecto a los valores obtenidos para el pH, éstos excedían los límites máximos permisibles en la zona del río Chalchigüe para la época lluviosa; durante la época seca toda la microcuenca tenía niveles aceptables de pH.

Las concentraciones de cationes y aniones en la microcuenca del río Los Limones se ven afectadas por distintos procesos. En el caso del potasio, fosfato y nitrato, sus concentraciones pueden estar relacionadas con el uso de fertilizantes en la zona de estudio. Para el resto de los iones, hay que considerar las interacciones agua-roca y las diferencias estacionales entre períodos secos y lluviosos (J. Cabassi, comunicación personal, 23 de mayo, 2022) podrían estar influyendo estos valores de concentraciones.

Las mediciones de ORP realizadas en los distintos puntos de muestreo permiten definir a MBORBO-01 como ideal para actividades relacionadas con la acuicultura, puesto que su valor de ORP cae dentro del rango óptimo de 150-250 mV (Sensorex, 2019). Dato importante que se debe tomar en cuenta si quiere implementar este tipo de ocupación en la microcuenca, sin dejar de lado el manejo apropiado de los desechos originados en dicha actividad.

En los gráficos de líneas de temperatura y DO% es posible ver la relación entre estas dos variables, cumpliéndose en el sitio de muestreo MBORBO-01, que, durante la época lluviosa, a mayor temperatura menor DO% y en MSANTO-01, a menor temperatura mayor DO%. De igual forma durante la época seca se comprobó en MBORBO-01 que, a mayor temperatura, menor DO%. Sin

embargo, esta relación no se cumplía en el resto de los sitios de muestreo, algo que debe investigarse más a profundidad en futuros estudios.

Recomendaciones y trabajo futuro

Incrementar el número de sitios de muestreo de iones mayoritarios en la microcuenca del río Los Limones a una cantidad comprendida entre 30 y 40 sitios, considerando distintos tipos de fuente: manantiales, pozos excavados, pozos perforados y ríos; para ello se debe procurar que el número de sitios de muestreo por tipo sea igual o similar para evitar que un tipo específico tenga más peso que el resto. De esta forma se podrá contar con una imagen más fidedigna de la hidrogeoquímica de la zona tanto en términos de distribución espacial como de tiempo.

Realizar la caracterización isotópica (mediante la medición de las concentraciones de Deuterio y Oxígeno 18 en la molécula de agua analizada) de la microcuenca del río Los Limones con el objetivo de determinar las zonas de recarga de la microcuenca del río Los Limones y así proceder a una protección más sistemática.

Investigar la causa de los bajos niveles de oxígeno disuelto alrededor del manantial MBORBO-01 y cómo puede relacionarse esto con la biota.

Realizar el balance hídrico de la microcuenca mediante el método de Schosinsky-Losilla, ya que es utilizado en varios estudios recientes (M. Barrera de Calderón & Juárez, 2013). Para realizar el balance hídrico se deben identificar los manantiales, pozos perforados y artesanales para un mejor monitoreo de los recursos hídricos de la zona de estudio; también se deben llevar a cabo campañas de aforo de ríos y manantiales de forma que se establezcan las entradas y salidas de agua a la microcuenca. Los resultados de dicho balance se pueden comparar con otros métodos como el método RAS (Junker, n.d.), de Hargreaves (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2005) o Thornthwaite y Mather (Marini & Piccolo, 2000).

Elaborar un mapa de fuentes puntuales y difusas de contaminación para toda la microcuenca del río Los Limones, utilizando el método POSH, el cual se describe en el trabajo “Evaluación del riesgo de contaminación por plomo en agua subterránea en el Cantón Sitio del Niño, municipio de San Juan Opico”. Este tipo de mapa podría incluir distintos tipos de fuentes como podría ser las granjas piscícolas y los vertidos provenientes de fumigaciones en los cultivos de la microcuenca del río Los Limones. Este mapa luego puede utilizarse con un mapa de vulnerabilidad para determinar el nivel de riesgo en que se encuentra la microcuenca del río Los Limones.

Implementar una red de control con pozos de observación que permitan muestrear la zona deseada del acuífero, evitando además el contacto de la muestra con el aire atmosférico que da lugar al cambio de las propiedades fisicoquímicas del agua.

Se recomienda realizar análisis microbiológicos y de metales pesados a los distintos puntos de muestreo en la microcuenca para complementar el presente estudio. Así mismo, la realización de modelados de las especies mineralógicas vendría a enriquecer el conocimiento obtenido de la microcuenca del río Los Limones, permitiendo predecir el comportamiento de diferentes compuestos minerales en la microcuenca y sus interacciones.

- Amaya Arévalo, A. J. (2015). *Evaluación hidrogeoquímica e hidroquímica de la subcuenca del río Aranchacal* [Maestría inédita]. Universidad de El Salvador.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.). A. A. Balkema Publishers.
- Aquaread. (2019). *Instruction Manual for the Aquaprobe AP-5000 Multiparameter Water Quality Probe and associated Aquameter, Utilities and Accesories*.
<https://www.aquaread.com/products/water-quality/ap-5000>
- Asociación Nacional de Acueductos y Alcantarillados, & Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. (2008). *Mapa Hidrogeológico, Zona de Chalatenango [A-2]* [Map].
- Barrera de Calderón, M., & Juárez, M. (2013). *Evaluación cuantitativa del recurso hídrico subterráneo de la microcuenca del río San Antonio, municipio de Nejapa, departamento de San Salvador*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Barrera de Calderón, M. L. (2010). *Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de áreas de recarga en el acuífero de San Salvador* [Maestría inédita]. Universidad de El Salvador.
- Capítulo 5 Mapas de isolíneas. (n.d.). <http://redgeomatrica.rediris.es/cartos2/pdf/pdfT/tema5t.pdf>
- Cuadra Zelaya, C. D., & Romero García, D. A. (2006). *Aplicación de biomonitores para evaluar la contaminación por metales pesados en el lago Suchitlán*. Universidad de El Salvador.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea* (2nd ed., Vol. 1). Omega.
- Dirección General de Estadísticas y Censos. (2007). *VI Censo de Población y V de Vivienda 2007*.
<http://www.digestyc.gob.sv/servers/redatam/htdocs/CPV2007S/index.html>
- Dubón, M. E., & Rodríguez Ortega, O. J. (2011). *Las tierras subutilizadas y su impacto en el desarrollo socioeconómico en el departamento de Chalatenango*. Universidad de El Salvador.

- Enginyeria Sense Fronteres. (2016, September 9). *Sobreexplotación hídrica ilegal en Suchitoto, El Salvador*. <https://esf-cat.org/blog/2016/09/09/sobreexplotacion-hidrica-ilegal-suchitoto-salvador/>
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* (1st ed.). Prentice-Hall.
- Global Water Partnership Central America. (2010). *Experiencias de Agua Potable y Saneamiento con enfoque de Gestión Integrada de Recursos Hídricos en El Salvador*.
https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/experiencias-apys-sv.pdf
- Güler, C., Thine, G. D., McCay, J. E., & Turner, A. K. (2002). Evaluation of graphical and statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10, 455–474.
- Hem, J. D. (1985). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water* (3rd ed.). U.S. Geological Survey.
- Hernández, M. A. (2019). *El Sistema de Información Geográfica, una herramienta para la gestión del territorio*.
- Hernández Rodríguez, E. R. (2013). *Análisis de la sostenibilidad de los operadores de sistemas de agua potable y saneamiento en el municipio de Suchitoto, departamento de Cuscatlán*. Universidad de El Salvador.
- Junker, M. (n.d.). *Método RAS para determinar la Recarga de Agua Subterránea*. FORGAES-Unión Europea.
- Lee, S., Wolberg, G., & Shin, S. Y. (1997). Scattered Data Interpolation with Multilevel B-Splines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 3(3).
- Marini, M. F., & Piccolo, M. C. (2000). El balance hídrico en la cuenca del río Quequén Salado, Argentina. *Papeles de Geografía*, 31, 39–53.
- Martínez, A. D. (2012). Tratamiento de desechos del cianuro por biorremediación. *Tecnología En Marcha*, 25(2), 61–72.

- Martínez de Jesús, G. (2008). *Eliminación de sulfatos en un reactor de lecho móvil anaerobio-aerobio*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso hídrico de El Salvador, con énfasis en zonas prioritarias*.
- Nováková, D. H. (2006). A hydrogeological study of the northern parts of the La Libertad, San Salvador, and Cuscatlán Districts in El Salvador: A regional and integrated study. *Environmental Geology*, 53, 27–33.
- OriginLab Corporation. (2021). *OriginPro* (Version 2021b) [Computer software]. Descargado de https://www.originlab.com/demodownload_ext.aspx?d=1&s=S
- Ortiz Portillo, I. M., & Rodríguez Canacas, A. C. (2009). *Diseño y construcción de un reactor a escala de planta piloto para el tratamiento fotocatalítico de azul de metileno y cromo VI en aguas*. Universidad de El Salvador.
- Payes Hernández, J. E. (2014). *Evaluación del riesgo de contaminación por plomo en agua subterránea en el Cantón Sitio del Niño, Municipio de San Juan Opico* [Maestría inédita]. Universidad de El Salvador.
- Renderos Mejía, G. A. (2019). *Caracterización hidrogeológica de la microcuenca del río Los Amates, municipio de Suchitoto, departamento de Cuscatlán, El Salvador* [Trabajo de grado]. Universidad de El Salvador.
- Sayre, A. N., & Taylor, G. C. (1951). *Ground-Water Resources of the Republic of El Salvador Central America* (No. 1079-D). U.S. Geological Survey.
- Sensorex. (2019, October 22). Calculating ORP measure in water [https://sensorex.com/2019/10/22/calculating-orp-measurement-water/]. *The Sensorex Blog*.

Servicio Geológico Checo, & Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (2004). *Estudio de los peligros geológicos en los departamentos La Libertad, San Salvador y Cuscatlán, El Salvador*.

Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (2005). *Balance Hídrico Integrado y dinámico*.

Simler, R. (2021). *Diagrammes* (6.76) [Computer software]. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. Descargado de <http://www.lha.univ-avignon.fr/>

Villegas, P. (2011, December 1). Tutorial de diagrammes (hidroquímica de aguas subterráneas). *Agua y SIG*.

Tabla 7.1. Concentraciones de aniones mayoritarios, muestreo época lluviosa

Punto	meq/l					Suma aniones
	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	PO ₄	
Pchal-01	1.3702	0.2319	0.0427	0.0119	0.0155	1.6722
Rchal-01	0.0000	0.3481	0.1747	1.3356	0.0047	1.8630
Papol-01	2.5306	0.1599	0.0962	0.0213	0.0139	2.8219
Mbor-01	2.4457	0.1599	0.1066	0.0187	0.0161	2.7470
Rlim-01	1.3587	0.1599	0.3210	0.0451	0.0145	1.8992

Tabla 7.2. Concentraciones de cationes mayoritarios, muestreo época lluviosa

Punto	meq/l				Suma cationes
	Ca	Mg	Na	K	
Pchal-01	0.7755	0.3407	0.2806	0.1368	1.5336
Rchal-01	0.2320	0.0979	0.1535	0.0775	0.5610
Papol-01	1.2276	1.1438	0.8221	0.0826	3.2761
Mbor-01	1.1952	0.9545	0.5589	0.0130	2.7216
Rlim-01	0.6777	0.4526	0.4198	0.1082	1.6583

Tabla 7.3. Porcentajes de aniones mayoritarios, muestreo época lluviosa

Punto	%					Suma aniones
	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	PO ₄	
Pchal-01	81.9386	13.8677	2.5535	0.7133	0.9269	100.0
Rchal-01	0.0000	18.6831	9.3761	71.6884	0.2523	100.0
Papol-01	89.6779	5.6664	3.4091	0.7540	0.4926	100.0
Mbor-01	89.0317	5.8209	3.8806	0.6807	0.5861	100.0
Rlim-01	71.5394	8.4192	16.9015	2.3765	0.7635	100.0

Tabla 7.4. Porcentajes de cationes mayoritarios, muestreo época lluviosa

Punto	%				Suma cationes
	Ca	Mg	Na	K	
Pchal-01	50.5662	22.2152	18.2964	8.9222	100.0
Rchal-01	41.3622	17.4545	27.3695	13.8138	100.0
Papol-01	37.4712	34.9133	25.0938	2.5217	100.0
Mbor-01	43.9146	35.0707	20.5354	0.4793	100.0
Rlim-01	40.8674	27.2932	25.3153	6.5241	100.0

Tabla 7.5. Conductividades eléctricas en puntos de muestreo, época lluviosa

Punto	Cond. Eléctrica (μS/cm)
Pchal-01	149
Rchal-01	70
Papol-01	284
Mbor-01	257
Rlim-01	91

Tabla 7.6. Concentraciones de aniones mayoritarios, muestreo época seca

Punto	meq/l					Suma aniones
	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	PO ₄	
PCHAL-01	1.4319	0.1972	0.1145	0.0000	0.0133	1.7569
MBORBO-01	1.7115	0.1972	0.1918	0.0179	0.0123	2.1307
PAPOL-01	1.6416	0.2465	0.1122	0.0161	0.0107	2.0272
RLIM-01	1.5368	0.1478	0.2180	0.0161	0.0145	1.9332
RLIM-02	1.4319	0.1972	0.2042	0.0142	0.0158	1.8633

Tabla 7.7. Concentraciones de cationes mayoritarios, muestreo época seca

Punto	meq/l				Suma cationes
	Ca	Mg	Na	K	
PCHAL-01	0.7855	0.7348	0.4241	0.2801	2.2245
MBORBO-01	1.0020	1.0080	0.3971	0.3389	2.7461
PAPOL-01	1.1143	0.9504	0.2262	0.1867	2.4776
RLIM-01	0.9152	0.7348	0.3001	0.2391	2.1893
RLIM-02	0.8733	0.7488	0.2936	0.2647	2.1804

Tabla 7.8. Porcentajes de aniones mayoritarios, muestreo época seca

Punto	%					Suma aniones
	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	PO ₄	
PCHAL-01	81.5047	11.2224	6.5178	0.0000	0.7552	100.0
MBORBO-01	80.3282	9.2537	8.9996	0.8402	0.5782	100.0
PAPOL-01	80.9780	12.1609	5.5357	0.7956	0.5298	100.0
RLIM-01	79.4928	7.6455	11.2758	0.8343	0.7516	100.0
RLIM-02	76.8483	10.5812	10.9612	0.7617	0.8476	100.0

Tabla 7.9. Porcentajes de cationes mayoritarios, muestreo época seca

Punto	%				Suma cationes
	Ca	Mg	Na	K	
PCHAL-01	35.3105	33.0340	19.0653	12.5902	100.0
MBORBO-01	36.4899	36.7076	14.4617	12.3408	100.0
PAPOL-01	44.9753	38.3599	9.1291	7.5357	100.0
RLIM-01	41.8037	33.5643	13.7090	10.9231	100.0
RLIM-02	40.0514	34.3425	13.4656	12.1405	100.0

Tabla 7.10. Conductividades eléctricas en puntos de muestreo, época seca

Punto	Cond. Eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)
MBORBO-01	216
PAPOL-01	232
PCHAL-01	192
RLIM-01	209
RLIM-02	208