



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA

CIRA/UNAN-MANAGUA



Trabajo de Tesis
Para optar al grado de
Máster en Ciencias del Agua

Título

“Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en
la cuenca El Sauce, León”

Autor

Ing. Eduardo Emilio Soza Ferrufino

Tutor: MSc. Enoc Castillo Hernández

Asesor: MSc. Elizabeth Peña Solano

MSc. Yelba Flores Meza

Managua, 1 de febrero 2021

Financiado por: Proyecto Manejo de Agua en Nicaragua y Centroamérica; y el Centro Para la Investigación En Recursos Acuáticos de Nicaragua, CIRA/UNAN-Managua.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA



CIRA/UNAN-MANAGUA

Maestría Regional Centroamericana en Ciencias
del Agua con énfasis en Calidad del Agua

2020: "Año de la Educación con Calidad y Pertinencia"

REF.: PMRCA / PGV – 40 / 2020

Acta de Defensa de Tesis de Posgrado No. 40

De acuerdo con lo establecido por la Ley No. 89 (Ley de Autonomía de las Instituciones de Educación Superior) y en el Título VII del Reglamento de Educación Continua y Estudios de Posgrado de la UNAN – Managua, la Comisión del Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua conformó el Tribunal Examinador para el Acto de Defensa de Tesis de Maestría del Ingeniero Eduardo Emilio Soza Ferrufino, estudiante del IV Ciclo con Carnet No. 12-30146-6, con los siguientes miembros:

MSc. Blanca Guadalupe Castillo Treminio	Presidente
MSc. Maximina Altamirano Espinoza	Secretaria
MSc. Bertha Amalia Fierro Correa	Vocal

Con el objetivo de evaluar el acto de defensa de la tesis titulada "Disponibilidad del potencial hídrico y contaminación por Arsénico con fines del manejo sostenible en la Cuenca El Sauce, León"

Siendo las 09h:00 del día martes 30 de junio del 2020, se encuentra reunido el Tribunal Examinador en el Aula de la Maestría del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua), habiendo evaluado el documento de tesis escrito y escuchado la presentación y defensa del tema, y recibidas las respuestas a las preguntas formuladas por los miembros de este tribunal presente, le otorgamos la calificación cualitativa de Aprobado por Unanimidad correspondiendo a la calificación cuantitativa de Noventa (90), con lo cual se dan por concluidos los requisitos para que el Ingeniero Eduardo Emilio Soza Ferrufino obtenga el título de Máster en Ciencias del Agua.

¡A la libertad por la Universidad!

Hospital Monte Espera 200 metros al norte, Cod. Postal 4598 | Managua, Nicaragua | www.unan.edu.ni
Tel.: ++ (505) 2278-9981 y 82 ext. 8320 | Correo: yberja.delgado@cira.unan.edu.ni, rocelito.cibacastelazo@yahoo.com, cira@unan.edu.ni

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA



CIRA/UNAN-MANAGUA

Maestría Regional Centroamericana en Ciencias
del Agua con énfasis en Calidad del Agua

2020: "Año de la Educación con Calidad y Pertinencia"

El Tribunal Examinador asigna las siguientes recomendaciones a ser incorporadas al documento final de tesis (ver documento anexo). Una vez realizadas estas se le concede el Título de Máster en Ciencias del Agua.

Leída que fue la presente acta de defensa de tesis del Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua, la encontramos conforme, ratificamos y firmamos en la ciudad de Managua, República de Nicaragua, a los treinta días del mes de junio del año dos mil veinte.

MSc. Bianka Guadalupe Castillo Tremblé
Presidenta

MSc. Maximina Altamirano Espinoza
Secretario

MSc. Bertha Amalia Fierro Correa
Vocal

MSc. Valeria Delgado Quezada
Coordinadora
Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del
Agua con énfasis en Calidad del Agua
CIRA/UNAN-Managua



Cc: Archivo

¡A la libertad por la Universidad!

Hospital Monte España 300 metros al norte, Céd. Postal 4598 | Managua, Nicaragua | www.cira.unan.edu.ni
Tel.: ++ 505-2278-6981 y 82 ext. 8038 | Correo: valeria.delgado@cira.unan.edu.ni, maestria.dcc@ciadlogua@yahoo.com, ciencia.agua@cira.unan.edu.ni

DEDICATORIA

A Dios, ya que cada paso y triunfo en mi vida, se lo debo a su Gracia y Soberanía.

A mi admirable familia, conformada por mi esposa Yajaira Patricia Villalobos Ñamendys y mi hija Emily Yajaira Soza Villalobos, siendo ambas, parte de tanta motivación para concluir lo que en un momento permaneció relegado.

A mis padres, Eduardo Luis Soza Campos y María de los Ángeles Ferrufino Quiroz, a quienes debo lo que soy, me impulsaron a superarme para tener éxitos en la vida y sin el apoyo de ellos durante mi temprana edad, esté triunfo no hubiera sido posible.

A la generación de hombres y mujeres, que con o sin título académico, contribuyen con la conservación de los recursos naturales, teniendo presente que estos no solo son patrimonio de la generación de hoy, sino también para las generaciones del mañana.

Ing. Eduardo E. Soza Ferrufino

AGRADECIMIENTOS

A la Red Centro Americana para el manejo de los recursos hídricos (REDCARA), por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo de investigación.

Al Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua), por el apoyo otorgado y la oportunidad de haberme permitido realizar los estudios de la *Maestría Ciencias de Agua*.

Al Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), por ser la institución donde inicie el proceso de mi formación en materia de agua y misma que me apoyo para dar inicio a los estudios de la *Maestría en Ciencias del Agua*.

A mi esposa e ingeniera *Yajaira Patricia Villalobos Ñamendys*, por su apoyo incondicional para que pudiera finalizar este trabajo de tesis y por las tantas palabras de ánimos que me motivaron siempre a seguir adelante.

A mi tutor de tesis, MSc. *Enoc Castillo Hernández*, por su valiosa tutoría y apoyo incondicional; a quien considero como mi mentor, transmitiéndome sus conocimientos hidrogeológico e hidrológico, teniéndole alta estima, porque en su interior, no hay ego, ni egoísmo en transmitir sus conocimientos.

A la MSc. *Valeria Delgado Quezada*, a quien le tengo alta estima, no limitándose únicamente a sus funciones como Coordinadora del Programa de Maestría, sino yendo más allá, animándome ante toda circunstancia y dándome estrategias que facilitaran el desarrollo de este proyecto de tesis.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en
la cuenca El Sauce, León

A mis asesores: MSc. Elizabeth Peña Solano y MSc. Yelba Flores Meza, por los aportes y sugerencias brindados.

A la Alcaldía municipal El Sauce, por abrirme la puerta, cada vez que requería de su apoyo en la facilitación de información, en especial a la Unidad Municipal de Agua y Saneamiento (UMAS - Alcaldía El Sauce) dirigida por el Ingeniero Adolfo Velásquez.

A la Autoridad Nacional del Agua (ANA), por contribuir de una u otra forma en la culminación de este trabajo de tesis y en especial a los ingenieros y compañeros de trabajo *Erwin Rueda Rodríguez* y *Marlon Sirias Silva* por la ayuda brindada, aportes y sugerencias en hidrología.

A la población del municipio de El Sauce que brindaron su valiosa y desinteresada ayuda en la realización de este estudio.

Finalmente quiero agradecer a *Jasmin Briones Alemán*, *David Guerra Calles*, MSc. *Irnan Busto Pérez* y MSc. *Harvin Bonilla Escoto*, por el apoyo que me brindaron en la fase de campo de este trabajo de tesis.

Ing. Eduardo E. Soza Ferrufino

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Área de estudio	2
1.1.1 Localización política - administrativa	2
1.1.2 Localización hidrográfica	4
1.2 Antecedentes	6
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivo general	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 Planteamiento del problema.....	9
1.5 Justificación.....	11
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Clima	12
2.2 Suelos	13
2.3 Cobertura y usos de la tierra	16
2.4 Geomorfología.....	19
2.5 Geología.....	21
2.5.1 Unidades geológicas	21
2.5.1.1 Cuaternario indiferenciado.....	21
2.5.1.2 Rocas del Grupo Coyol.....	22
2.5.1.3 Intrusivo ácido (Tia)	23
2.5.2 Estructuras geológicas	24

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en
la cuenca El Sauce, León

2.6	Unidades hidrológicas de la cuenca	26
2.7	Hidrogeoquímica	28
2.7.1	Tipos hidrogeoquímicos	28
2.7.2	Características químicas y físicas	30
2.7.2.1	Aniones.....	31
2.7.2.2	Cationes	31
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....		33
3.1	Etapa preliminar	33
3.2	Etapa de investigación de campo.....	33
3.2.1	Levantamiento geológico.....	33
3.2.2	Hidrología	34
3.2.2.1	Monitoreo de caudales en ríos	35
3.2.3	Hidrogeología	37
3.2.3.1	Monitoreo de niveles de agua.....	37
3.2.3.2	Pruebas de infiltración	39
3.2.4	Hidrogeoquímica	41
3.2.4.1	Medición de parámetros fisicoquímicos <i>in situ</i>	41
3.2.4.2	Muestreo de arsénico en aguas subterráneas y superficiales	42
3.3	Etapa de procesamiento de datos e interpretación de información.....	45
3.3.1	Aspectos socioeconómicos	45
3.3.1.1	Población en cuenca El Sauce	45
3.3.1.2	Producción pecuaria en la cuenca El Sauce	46
3.3.2	Selección de datos meteorológicos	46

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en
la cuenca El Sauce, León

3.3.2.1	Precipitación	47
3.3.2.2	Temperatura	49
3.3.2.3	Evapotranspiración	49
3.3.3	Dinámica de ríos.....	50
3.3.4	Infiltración del agua en los suelos.....	51
3.3.5	Recarga de la cuenca.....	52
3.3.5.1	Recarga por infiltración de lluvia.....	52
3.3.5.2	Recarga por retorno.....	54
3.3.6	Hidrodinámica de las aguas subterráneas	55
3.3.7	Características hidráulicas	55
3.3.8	Escurrimiento subterráneo	56
3.3.9	Uso y consumo.....	57
3.3.9.1	Consumo humano de agua	57
3.3.9.2	Uso pecuario.....	58
3.3.9.3	Uso agrícola	59
3.3.10	Balance hidrogeológico	59
3.3.11	Calidad hidrogeoquímica.....	60
3.4	Análisis e interpretación de resultados.....	61
3.5	Elaboración del documento final	61
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		62
4.1	Aspectos socioeconómicos	62
4.1.1	Población.....	62

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en
la cuenca El Sauce, León

4.1.1.1	Subdivisión comarcal del municipio El Sauce en la cuenca	63
4.1.2	Actividad económica.....	66
4.1.2.1	Actividad pecuaria	66
4.1.2.2	Actividad agrícola	67
4.2	Climatología	68
4.2.1	Precipitación.....	68
4.2.2	Temperatura.....	74
4.2.3	Evapotranspiración.....	75
4.3	Hidrología.....	76
4.3.1	Morfometría de la cuenca.....	76
4.3.2	Caudales de ríos	82
4.3.3	Caudales base en la cuenca	86
4.3.4	Relación agua superficial - subterránea	88
4.4	Hidrogeología.....	89
4.4.1	Inventario de fuentes subterráneas	89
4.4.2	Medio hidrogeológico	91
4.4.2.1	Unidades del medio hidrogeológico.....	92
4.4.2.2	Basamento hidrogeológico	97
4.4.3	Infiltración de las aguas en los suelos.....	99
4.4.4	Zonificación de recarga natural	100
4.4.5	Recarga directa promedio de la cuenca	104
4.4.6	Recarga por retorno	106

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en
la cuenca El Sauce, León

4.4.7	Características hidráulicas del acuífero.....	106
4.4.7.1	Transmisividad.....	107
4.4.7.2	Conductividad hidráulica.....	109
4.4.7.3	Capacidad específica.....	110
4.4.7.4	Coeficiente de almacenamiento.....	110
4.4.7.5	Espesores captados en el acuífero.....	111
4.4.7.6	Caudales de operación.....	111
4.4.8	Hidrodinámica del acuífero El Sauce.....	112
4.4.8.1	Profundidad del agua subterránea.....	112
4.4.8.2	Fluctuación interanual.....	115
4.4.8.3	Fluctuación estacional	117
4.4.8.4	Piezometría	119
4.4.8.5	Dirección de flujos	121
4.4.9	Escurrimiento subterráneo	123
4.4.10	Aprovechamiento del recurso	124
4.4.10.1	Consumo humano de agua	124
4.4.10.2	Consumo de agua actividad pecuaria.....	128
4.4.10.3	Consumo de agua actividad agrícola.....	128
4.4.10.4	Consumo de agua total en la cuenca	129
4.5	Balance hidrogeológico	130
4.5.1	Entradas al sistema	130
4.5.2	Salidas del sistema.....	131

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en
la cuenca El Sauce, León

4.5.3	Variación del almacenamiento (ΔS)	133
4.6	Calidad de las aguas.....	134
4.6.1	Parámetros fisicoquímicos de campo.....	134
4.6.1.1	Temperatura	135
4.6.1.2	Potencial de hidrogeno (pH)	137
4.6.1.3	Conductividad eléctrica.....	139
4.6.1.4	Sólidos totales disueltos	141
4.6.1.5	Oxígeno disuelto.....	142
4.6.1.6	Potencial redox	144
4.6.2	Contaminación natural por arsénico	146
4.6.2.1	Arsénico en las aguas superficiales.....	146
4.6.2.2	Arsénico en las aguas subterráneas.....	148
4.6.2.3	Zonas contaminadas por arsénico.....	153
4.6.2.4	Arsénico a diferentes profundidades del acuífero.....	154
4.6.2.5	Concentraciones de arsénico en el tiempo	155
4.6.2.6	Especiación del arsénico en las aguas de la cuenca.....	156
4.7	Líneas de estrategias para el manejo sostenible de los recursos hídricos.....	159
4.7.1	Gestión ante la contaminación natural por arsénico.....	161
4.7.2	Desarrollo de abastecimiento de agua potable	164
4.7.3	Desarrollo agropecuario	166
4.7.4	Desarrollo forestal	168
4.7.5	Aplicación de políticas en el agua subterránea	169

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	172
CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES	174
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA	176
CAPÍTULO 8. ANEXOS	180

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización política - administrativa de la cuenca	4
Figura 2. Mapa de ubicación hidrográfica de la cuenca El Sauce	5
Figura 3. Mapa de clasificación climática de la cuenca El Sauce.....	12
Figura 4. Mapa de órdenes de suelos en la cuenca El Sauce	16
Figura 5. Mapa de cobertura y usos de suelos de la cuenca El Sauce	18
Figura 6. Mapa de pendiente del terreno de la cuenca El Sauce	20
Figura 7. Mapa de unidades geológicas de la cuenca El Sauce	25
Figura 8. Mapa de unidades hidrológicas a nivel 8	28
Figura 9. Mapa hidrogeoquímico de la cuenca El Sauce	30
Figura 10. Rocas Grupo Coyol Inferior, Los Rascaderos	34
Figura 11. Afloramiento de rocas intrusivas ácidas río El Portillo.....	34
Figura 12. Aforo en río La Palma (A4) en Eduardo Contreras	36
Figura 13. Aforo en río San José (A3) en San José	36
Figura 14. Mapa de sitios de aforos en la cuenca El Sauce.....	37
Figura 15. Medición de NEA en época seca, PP13, San Nicolás.....	38
Figura 16. Medición de NEA en época lluviosa, PP14, San Nicolás	38
Figura 17. Mapa de red piezométrica en la cuenca El Sauce	39
Figura 18. Prueba de infiltración PI3 en zona del valle, Esquipulas	40
Figura 19. Prueba de infiltración PI13 en zona de laderas, El Guayabo	40
Figura 20. Mapa de pruebas de infiltración en época seca	41
Figura 21. Medición de parámetros fisicoquímicos de campo.....	43

Figura 22. Toma de muestra de agua para arsénico en PP28, La Laguneta	43
Figura 23. Mapa de sitios de muestreo en época lluviosa y seca	45
Figura 24. Mapa de ubicación de estaciones pluviométricas en la cuenca	48
Figura 25. Mapa de distribución de la precipitación media anual	74
Figura 26. Mapa de caudales en ríos, época seca y lluviosa de 2017	83
Figura 27. Mapa de inventario de fuentes subterráneas	91
Figura 28. Mapa de medio hidrogeológico de la cuenca El Sauce.....	94
Figura 29. Perfil longitudinal hidrogeológico A - A'	95
Figura 30. Perfil hidrogeológico transversal B - B'.....	96
Figura 31. Perfil hidrogeológico transversal C - C'	97
Figura 32. Mapa de profundidad del basamento hidrogeológico.....	98
Figura 33. Mapa de capacidad de infiltración del agua en los suelos	100
Figura 34. Mapa de zonas de recarga natural.....	105
Figura 35. Mapa de transmisividades de la cuenca El Sauce	109
Figura 36. Mapa de profundidad del agua subterránea.....	115
Figura 37. Mapa de isofreáticas en la cuenca El Sauce.....	123
Figura 38. Mapa de distribución de concentración de arsénico.....	153

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de los municipios en la cuenca	3
Tabla 2. Tipos de suelos en la cuenca El Sauce	15
Tabla 3. Cobertura y usos de la tierra en la cuenca El Sauce	17
Tabla 4. Distribución de las unidades geológicas en la cuenca El Sauce.	24
Tabla 5. Unidades hidrológicas de la cuenca El Sauce a nivel 8.....	27
Tabla 6. Concentraciones promedios de aniones y cationes.....	31
Tabla 7. Sitios de afloros en la cuenca El Sauce.....	35
Tabla 8. Sitios muestreados en agua superficial, para la colecta de muestras de arsénico por campaña de muestreo	43
Tabla 9. Sitios muestreados en agua subterránea, para la toma de muestras de arsénico por campañas de muestreo	43
Tabla 10. Estaciones pluviométricas ubicadas dentro y en el entorno de la cuenca	48
Tabla 11. Ecuación de velocidad en m/s de molinetes utilizados	50
Tabla 12. Propiedades físicas de los suelos y profundidad de las raíces.....	53
Tabla 13. Componentes del coeficiente de infiltración.....	54
Tabla 14. Caseríos ubicados en el interior de la cuenca por división comarcal, municipio de El Sauce.....	64
Tabla 15. Precipitación media mensual, periodo 2004 -2018	71
Tabla 16. Parámetros morfométricos de la cuenca El Sauce	81
Tabla 17. Caudales en época seca y lluviosa en la cuenca El Sauce	82
Tabla 18. Caudal base de la cuenca El Sauce.	88

Tabla 19. Resultados del balance hídrico de suelo por zona de recarga	101
Tabla 20. Volumen de recarga potencial media anual por zona de recarga	105
Tabla 21. Parámetros hidráulicos del acuífero El Sauce	106
Tabla 22. Escurrimiento subterráneo anual de salida.....	124
Tabla 23. Balance hidrogeológico de la cuenca El Sauce	133
Tabla 24. Resultados de parámetros físico-químicos.....	135
Tabla 25. Concentraciones de arsénico en aguas de pozos de ENACAL	152
Tabla 26. Tecnologías disponibles para la remoción del arsénico.....	162
Tabla 27. Líneas estratégicas de acción a corto, mediano y largo plazo.....	170

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Población del municipio vs población en cuenca.....	62
Gráfico 2. Población en la cuenca El Sauce	63
Gráfico 3. Población comarcal en cuenca El Sauce del municipio El Sauce	65
Gráfico 4. Ganado bovino en cuenca El Sauce.....	67
Gráfico 5. Curva de doble masa: precipitación media acumulada CHIRPS vs estación Los Tololos	69
Gráfico 6. Curva de doble masa: precipitación media acumulada CHIRPS vs estación Los Loros	69
Gráfico 7. Precipitación anual datos CHIRPS y estación Los Tololos.....	70
Gráfico 8. Precipitación anual de datos CHIRPS y estación Los Loros	70
Gráfico 9. Comportamiento de la precipitación media mensual	72
Gráfico 10. Comportamiento de la precipitación media anual.....	73
Gráfico 11. Comportamiento de la temperatura media mensual.....	75
Gráfico 12. Comportamiento de la evapotranspiración potencial media mensual	76
Gráfico 13. Polígonos de frecuencia de altitudes de la cuenca El Sauce	79
Gráfico 14. Curva hipsométrica río El Portillo.....	80
Gráfico 15. Perfil longitudinal del río El Portillo	81
Gráfico 16. Caudales en río El Portillo, época seca y lluviosa de 2013 y 2017....	84
Gráfico 17. Caudales en tributarios, época seca y lluviosa de 2013 y 2017	85
Gráfico 18. Caudales base en la cuenca, abril 2013, enero 2014 y abril 2017	87
Gráfico 19. Fluctuación interanual de niveles de agua en el acuífero poroso, 2013 y 2017	116

Gráfico 20. Fluctuación estacional de los niveles de agua en el acuífero poroso, año 2017	118
Gráfico 21. Fluctuación estacional de los niveles de agua en el acuífero fracturado, año 2017	119
Gráfico 22. Volumen anual de agua para consumo humano	128
Gráfico 23. Volúmenes anuales de agua subterránea según los usos.	129
Gráfico 24. Comportamiento de la temperatura en aguas subterráneas, época seca y lluviosa de 2013	137
Gráfico 25. Comportamiento del pH en las aguas subterráneas, época seca y lluviosa de 2013	139
Gráfico 26. Comportamiento de la conductividad eléctrica en aguas subterráneas, época seca y lluviosa de 2013	140
Gráfico 27. Comportamiento de los sólidos totales disueltos en aguas subterráneas, época seca y lluviosa de 2013	142
Gráfico 28. Comportamiento del oxígeno disuelto en aguas subterráneas, época seca y lluviosa de 2013.....	143
Gráfico 29. Comportamiento del potencial redox en las aguas subterráneas, época lluviosa de 2013.	144
Gráfico 30. Concentraciones de arsénico total en agua superficial, muestreo oct-13 y mar-14.....	148
Gráfico 31. Concentraciones de arsénico total en agua subterránea, muestreo oct-13 y mar-14.....	150
Gráfico 32. Concentraciones de arsénico total en época seca vs profundidad total de los pozos.	155

Gráfico 33. Concentraciones de arsénico total en agua subterránea, mayo 2006 vs marzo 2014.	156
Gráfico 34. Relación pH – Eh de los sitios de muestreado en época lluviosa....	157
Gráfico 35. Adaptado de <i>Diagrama Eh-pH de especies de arsénico</i> , de Litter et al, 2009. Especiación del arsénico en las aguas de la cuenca El Sauce.....	159

INDICE DE ANEXOS

Anexo I. Parámetros climáticos utilizados en el estudio	181
Anexo II. Caudales en ríos de la cuenca El Sauce.....	190
Anexo III. Inventario de fuentes subterráneas	194
Anexo IV. Medio hidrogeológico.....	198
Anexo V. Infiltración y recarga natural.....	201
Anexo VI. Estimación de la transmisividad.....	204
Anexo VII. Levantamiento de niveles estáticos y dinámicos	207
Anexo VIII. Aprovechamiento del recurso	210
Anexo IX. Parámetros físico químicos de campo en agua subterránea	215
Anexo X. Concentraciones de arsénico en aguas de la cuenca El Sauce	221

ABREVIACIONES

ACDI	Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional
ANA	Autoridad Nacional del Agua
CAPRE	Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana
CAPS	Comité de Agua Potable y Saneamiento
CIRA	Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua
ENACAL	Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios
FISE	Fondo de Inversión Social de Emergencia
INAA	Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados
INEC	Instituto Nicaragüense de Estadísticas y Censos
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
INIDE	Instituto Nacional de Información de Desarrollo
MABE	Mini Acueducto por Bombeo Eléctrico
MAG	Mini Acueducto por Gravedad
MAG	Ministerio Agropecuario
MARENA	Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales
MINSA	Ministerio de Salud
MIMAM	Ministerio de Medio Ambiente
NTON	Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense
ONG	Organismo No Gubernamental
UNAN	Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UNI	Universidad Nacional de Ingeniería

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio de aguas superficiales y subterráneas se ha realizado en el contexto de cumplir trabajo de tesis para optar al título de Maestro en Ciencias del Agua; así mismo aportar conocimientos hidrológicos e hidrogeológicos actualizados y ampliados en la cuenca El Sauce.

Este estudio ha sido posible por la contribución del CIRA/UNAN-Managua, Red CARA; así como de las instituciones afines al manejo de los recursos hídricos: INETER, ANA, ENACAL y Alcaldía municipal El Sauce.

La cuenca El Sauce posee una extensión de 367.07 Km², ubicada en la parte alta de la cuenca No. 60, formando parte de la divisoria de las aguas que drenan al océano Pacífico. Esta compartida entre los municipios de El Sauce y Santa Rosa del Peñón, donde el primer municipio representa el 97.3 % de la superficie total de la cuenca.

El objetivo general de este proyecto de investigación, fue determinar el potencial hídrico de las aguas subterráneas, la contaminación natural por arsénico en las aguas, además de establecer la formulación de líneas de estrategias para el manejo sostenible de los recursos hídricos de la cuenca.

Se desarrollaron actividades de campos, realizadas tanto para la época seca y lluviosa, que involucro medición de niveles estáticos y dinámicos, volúmenes de extracción de agua, aforos en ríos, medición de parámetros físico químicos de campo y campañas de muestreo para valorar contaminación natural por arsénico, así mismo incluyo una campaña de pruebas de infiltración en época seca.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

El río El Portillo tiene régimen permanente en zona de descarga, presentando caudal base toda la época seca, en cambio algunos tributarios principales reducen sus caudales significativamente en época seca.

Las unidades geológicas presente en la cuenca delimitan a un acuífero poroso y fracturado, el primero compuesto de sedimentos del cuaternario que contribuye al almacenamiento y transporte del agua, en cambio el segundo se encuentran mantos aislados, donde predominan las rocas del Grupo Coyol Inferior, altamente fracturado, de baja permeabilidad secundaria, generando déficit de aguas en las comunidades rurales ubicadas en las partes altas de la cuenca.

De acuerdo a los resultados del estudio, indican que el acuífero ha tenido rebajamiento en los últimos años. La disponibilidad del acuífero es 96.90 Mm³/a, como un volumen excedente, obtenido del balance hidrogeológico, indicando que el acuífero posee reserva de agua, producto del aprovechamiento extensivo.

La meteorización de las rocas del periodo terciario ha contribuido en la alteración de las aguas subterráneas y superficiales de la cuenca, las que presentan contaminación natural del arsénico. Los resultados indican que las aguas subterráneas tienen la mayor afectación, determinado concentraciones mayores al valor máximo admisible para consumo humano.

Finalmente se establecen líneas estrategias, a fin de que los tomadores de decisiones puedan contar con estas e implementarlas a corto, mediano y largo plazo, a manera que las acciones contribuyan al manejo sostenible de los recursos hídricos en la cuenca.

Palabras clave: cuenca El Sauce, acuífero, potencial hídrico, aprovechamiento, calidad del agua, arsénico.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El presente se realizó en el marco del plan de estudio de la Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua con énfasis en calidad del agua, impartida en el Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua, de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (CIRA/UNAN - Managua), así mismo como requisito, para optar al grado de máster en Ciencias del Agua.

El proyecto de investigación se desarrolló en la cuenca El Sauce, la geomorfología define en interior el acuífero intramontano valle de El Sauce, explotando el recurso, para el abastecimiento de la población urbana y comunidades rurales del municipio.

La principal fuente de las comunidades rurales ubicadas en las partes altas de la cuenca proviene de fuentes subterránea, aprovechándolas principalmente a través de manantiales y en segunda instancia a través de pozos, los que cuentan con poca o ninguna protección, expuestos a la contaminación generada por las actividades antropogénicas.

Las actividades antropogénicas como, deforestación en las partes alta de la cuenca, avance de las fronteras agrícolas en la zona del valle, la actividad pecuaria desarrollada tanto en la zona del valle y parte alta de la cuenca, todas han trascendido sobre los recursos hídricos, generando impacto en la disponibilidad del recurso, la calidad del agua y la afectación directa a la salud humana. Por otra parte, se tiene la contaminación natural de las aguas, por la presencia de arsénico, asociado a la actividad volcánica del terciario que originó al acuífero.

El estudio se elaboró con un enfoque integral de los recursos hídricos, en atención a la problemática de déficit de agua, donde están expuesta, tanto la población

urbana y rural, para esta última, asociada a la baja productividad de los sitios de aprovechamientos; mientras el déficit de agua en la zona urbana, obedece al crecimiento demográfico y desarrollo de la actividad agropecuaria, demandando mayor consumo del recurso.

En vista de la importancia de los recursos hídricos para el desarrollo de la población del municipio de El Sauce, es necesario dotar a los planificadores del agua, el estado actual del recurso, en ese sentido, se determinó el potencial hídrico y contaminación por arsénico.

La valoración del potencial hídrico, como la contaminación por arsénico en el agua, proveen de una herramienta importante en la planificación del uso del agua, a fin de que se asegure una adecuada explotación, protección y conservación del recurso en la cuenca, y con ello garantizar el aprovechamiento actual y futuro del recurso. Por tanto, este estudio ofrece una herramienta a la población, que contribuye a una buena gestión de los recursos hídricos desde el enfoque integral de cuenca.

1.1 Área de estudio

A efecto de conocer la ubicación de la cuenca acorde a la división política-administrativa del país e hidrográfica, se describen la naturaleza de estas.

1.1.1 Localización política - administrativa

Atendiendo la división política-administrativa del país, la cuenca El Sauce se localiza en los municipios El Sauce y Santa Rosa del Peñón, ocupando mayor extensión territorial en el primer municipio; ambos pertenecen a la región norte del departamento de León.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

El municipio de EL Sauce posee una superficie de 693.78 km², donde la cuenca ocupa 355.95 km²; mientras Santa Rosa del Peñón una superficie de 226.70 km², ocupando la cuenca tan solo 11.12 km².

Acorde a la metodología de Pfafstetter la cuenca posee una extensión de 367.07 km², de esta, a El Sauce le corresponde el 96.97% y Santa Rosa del Peñón el 3.03%, por tanto, de acuerdo a división política-administrativa, el manejo de los recursos hídricos le corresponde principalmente a El Sauce, (tabla 1).

Tabla 1. Distribución de los municipios en la cuenca

Municipio	Área del municipio (km ²)	Área del municipio en cuenca (km ²)	Porcentaje en cuenca (%)
El Sauce	693.78	355.95	96.97
Santa Rosa del Peñón	226.70	11.12	3.03

La naciente del río principal denominado río San José, se ubica en territorio de Santa Rosa del Peñón, en esta zona se alcanza las mayores elevaciones de la cuenca.

La única ciudad localizada en el área de estudio, es El Sauce, ubicada en la parte central de la cuenca, en las coordenadas 550146E, 1424441N; por otra parte, el área de estudio se encuentra comprendida entre las coordenadas UTM, 536616 – 562164 Este; 1413587 – 1435409 Norte. La ciudad cuenta con cuatro vías principales que permiten la comunicación con los municipios adyacentes a esta, (figura 1).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

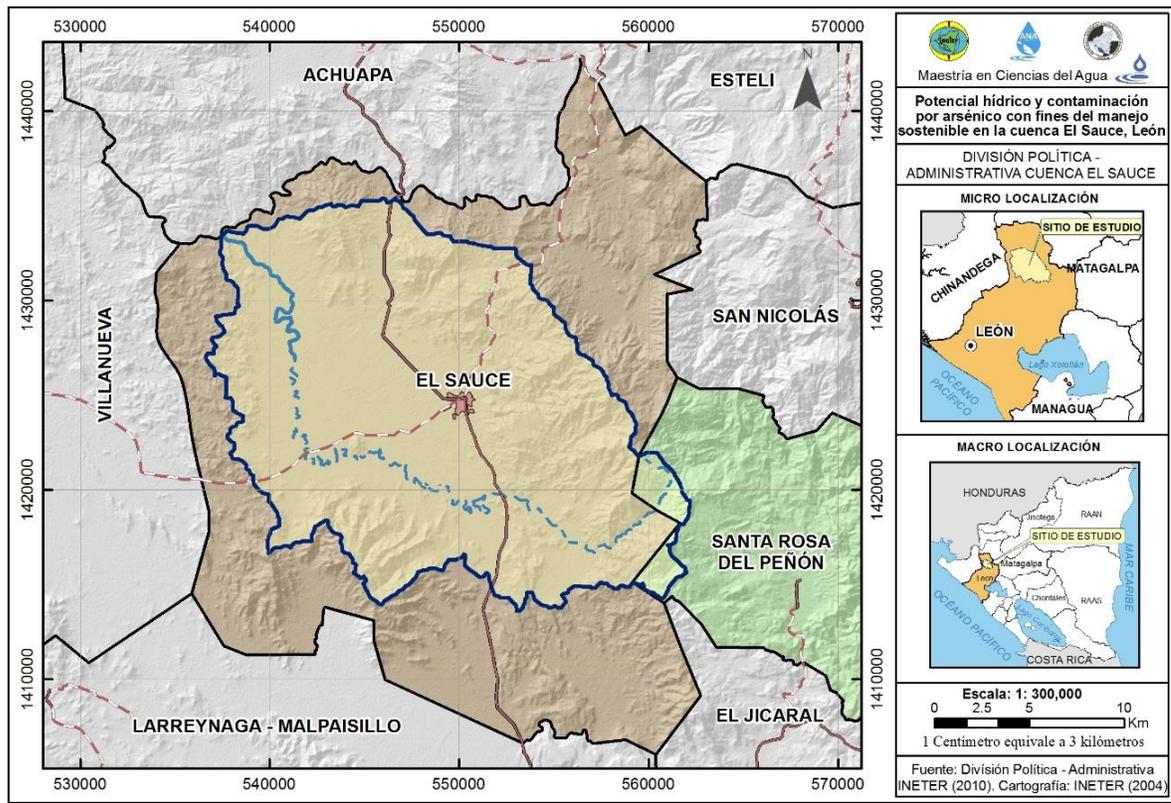


Figura 1. Mapa de localización política - administrativa de la cuenca El Sauce

1.1.2 Localización hidrográfica

De acuerdo a la metodología Pfafstetter, que delimita las cuencas hidrográficas por niveles de forma jerarquizada e implementada por INETER et al (2014); la cuenca El Sauce corresponde al nivel 7, adquiriendo código 9533768, está a la vez se circunscribe en la cuenca 953376, la que atendiendo la delimitación del proyecto hidrometeorológico centroamericano (Basso, 1972) se compone tanto de la cuenca No. 60 y No. 58, “Río Estero Real”, y “Río Negro”, respectivamente.

En el marco del proyecto hidrometeorológico centroamericano (Basso, 1977) la cuenca El Sauce se ubica en la parte alta de la cuenca No. 60, “Río Estero Real”, que pertenece a la vertiente del Pacífico.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

El río principal de la cuenca es denominado El Portillo en la parte baja y media de la cuenca y río San José en la parte alta de la cuenca, posee una longitud de 59.25 km, drenando con orientación sureste – noroeste, descargando en el río Grande, que aguas abajo se denomina río Villanueva; está clasificada como exorreica, debido que toda la red de drenaje descarga a otra unidad hidrográfica, (figura 2).

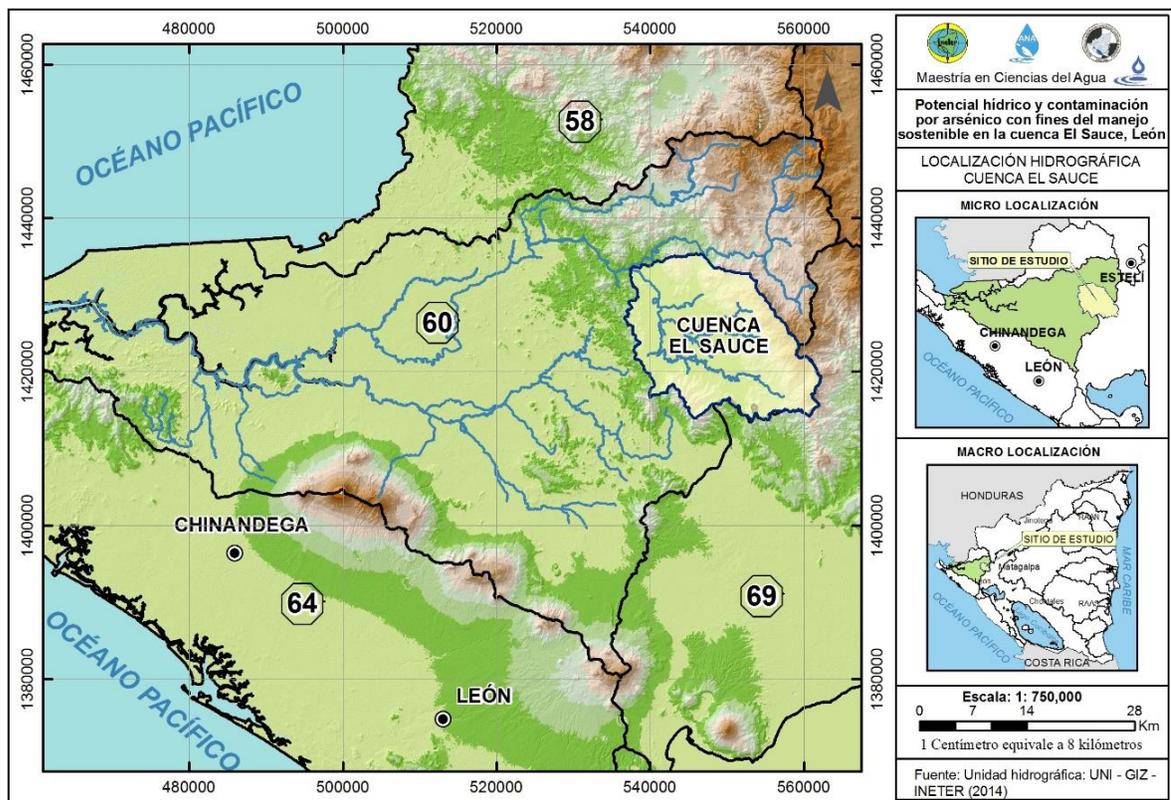


Figura 2. Mapa de ubicación hidrográfica de la cuenca El Sauce

1.2 Antecedentes

Para la valoración de este estudio se ha contado con estudios hidrogeológicos e hidrológicos, de los cuales se presentan resultados principales:

INETER (2008), realizó “Estudio de potenciales y calidad de los acuíferos del norte de León y Chinandega cuenca El Sauce”, a escala 1:50,000, con el levantamiento *in situ* se desarrolló en diciembre 2005 a mayo de 2006. Se describen los principales hallazgos de dicho estudio.

- El comportamiento de caudales bases en la cuenca responde a la variación estacional, en verano reducen el caudal y muchos de estos se infiltran por completo en el subsuelo, induciendo este comportamiento un carácter de influente de los ríos al acuífero.
- Se valoró la fluctuación de niveles estáticos en 32 pozos, evaluado para los años 1972 y 2005, de los cuales se obtuvo un rebajamiento de 0.7 m, atribuyéndolo a factores ambientales y de la integración del balance hídrico subterráneo se obtuvo 114.95 Mm³/a como un volumen de agua excedente disponible en la cuenca.
- La caracterización de la calidad del agua en el acuífero El Sauce, considero la composición físico-química, contaminación bacteriológica, por plaguicidas y de metales pesados, siendo este último el de mayor preocupación en la cuenca, debido a la presencia de arsénico, con concentraciones que oscilan desde 2.18 – 8.03 µg/l, menor a los 10 µg/l de la norma CAPRE.
- Por otra parte, en el estudio se representa la zonificación del carácter químico de las aguas subterráneas para la zona del valle, en el cual prevalecen las aguas del

tipo bicarbonatada cálcica sódica ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$) y las bicarbonatadas sódicas ($\text{HCO}_3\text{-Na}$).

Krásný & Hecht (1998), elaboró el “Estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de la región del Pacífico de Nicaragua”, hoja Managua, escala 1:250 000, caracterizando las aguas subterráneas y definiendo para el área del valle intramontano valores de transmisividad de 10 – 1,000 m^2/d , de denominación moderada a alta, así mismo, incluyó el comportamiento hidrodinámico de los flujos de agua, donde las isofreáticas oscilan desde los 150 – 100 m^2/d ; por otra parte, evaluó la génesis de las aguas subterráneas, predominando el tipo bicarbonatada cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$).

INETER, UNI, MAG, ANA & GIZ (2014), implementaron la metodología Pfasftetter para la nueva delimitación de unidades hidrográficas, alcanzando un total de 517 para el país, las que presentan menor extensión a medida que alcanzan mayor nivel jerárquico, sin embargo, esto permite lograr una mejor gestión de los recursos ambientales que en ellas prevalecen. De esta delimitación se obtuvo el área de estudio, correspondiente a la unidad hidrológica 9533768 (nivel 7), nombrada para el caso de estudio como la “Cuenca El Sauce”.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Determinar el potencial hídrico y contaminación por arsénico de los recursos hídricos para el manejo sostenible y beneficio de la población en la cuenca El Sauce.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el medio físico de la cuenca El Sauce.
- Determinar el potencial hídrico en la cuenca, a través de la valoración del balance hídrico subterráneo.
- Valorar los niveles de concentración de arsénico en el agua subterránea y superficial de la cuenca El Sauce.
- Formular líneas de estrategias para el manejo sostenible de los recursos hídricos en la cuenca.

1.4 Planteamiento del problema

Numerosos acuíferos en nuestro país están experimentando una extrema reducción de la disponibilidad de agua producto del manejo inadecuado de los recursos hídricos, siendo una causa del aprovechamiento de los mismos, que se acentúa cada día más en el uso de este recurso en la agricultura, ganadería y el abastecimiento a la población que continuamente está en aumento.

La cuenca El Sauce ubicada en la región norte del Pacífico, presenta explotación del recurso subterráneo, destinada principalmente para el consumo en agua potable y la producción pecuaria.

Actualmente se desconoce el potencial hídrico de la cuenca El Sauce; cuencas como esta han sido sometida a las frecuentes sequía, por situarse en la zona oeste del corredor seco, por otro lado, la erosión de los suelos, la deforestación y las prácticas agropecuarias inadecuadas, ha aportado, que la mayor parte de los principales ríos y quebradas de esta zona, sean de curso estacionario, que progresivamente genera reducción en la disponibilidad del recurso agua, impactando directamente en el descenso de los mantos acuíferos.

Las comunidades rurales dispersas localizadas en las partes altas del interior del área presentan desabastecimiento de agua, debido que el recurso es escaso, asociado a la baja productividad del acuífero fracturado que predomina en las zonas escarpadas, en esta zona prevalecen principalmente captaciones a través de manantiales y algunos pozos excavados, pocos productivos, y en la mayoría de los casos sin las medidas necesarias de protección, además, que se desconoce la calidad del agua de los mismos.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

En el valle y parte alta de la cuenca se practica la ganadería extensiva, por otra parte, el avance de las fronteras agrícolas, han venido desarrollándose, aumentando la deforestación, como consecuencia, mayor erosión y escorrentía, menor infiltración y reducción en la recarga a los mantos acuíferos; por otro parte, se presenta reducción del caudal base en las fuentes de aguas superficiales y fluctuaciones del régimen de lluvia que afecta el potencial hídrico en la cuenca.

La calidad de las aguas en la cuenca es afectada por la contaminación de forma natural de arsénico, por tanto, demandando vigilancia para poder ser aprovechadas por la población y en los distintos usos para el desarrollo del municipio.

Finalmente es de interés destacar, que en el área se requiere de una valoración hídrica, destacando resultados que permiten la toma de decisión a los pobladores y organizaciones que intervienen en el manejo y gestión de los recursos hídricos.

1.5 Justificación

En el interior de la cuenca El Sauce se ubica el acuífero intramontano “Valle El Sauce”, de importancia hidrogeológica, porque este posee las fuentes subterráneas de abastecimiento de la población urbana del municipio El Sauce, además, a estos se suma su importancia económica enmarcada en la producción pecuaria.

El estudio se desarrolló con el objetivo de dotar de una herramienta a los tomadores de decisión, población y entidades gubernamentales y no gubernamentales, útil para el análisis del potencial de explotación en la cuenca El Sauce; que permitió cuantificar la disponibilidad del recurso hídrico actual, la evolución de la dinámica del agua subterránea y superficial, delimitación de zonas vulnerables a la sobreexplotación del recurso, así como, identificación de zonas de mayor potencial hídrico.

Por otra parte, al tratarse de un acuífero intramontano, donde la formación obedece a la actividad volcánica del terciario, dando origen a un medio enriquecido con sustancias inorgánicas tóxicas, no deseables como el arsénico, con el fin de identificar las zonas más afectadas y contribuir a la mitigación de las afectaciones del metaloide causada por la ingesta del agua con altas concentraciones.

No existe un manejo eficiente de los recursos hídricos, por lo cual no se contribuye con la conservación de la cuenca y por tanto influye en la economía de la zona.

Por tanto, es importante conocer las principales alternativas de abastecimiento de agua de la población y las diferentes actividades desarrolladas en la cuenca a través de dos grandes ejes de investigación: hidrogeológica y contaminación por arsénico.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificado (INETER, 2005) en la cuenca El Sauce se presenta un clima caliente y sub-húmedo con lluvia en verano (AW1 y AW2), este clima predomina en toda la región del pacífico y en la mayor parte de la región norte.

Se caracteriza por presentar una estación seca (noviembre a abril) y otra lluviosa (mayo a octubre). La precipitación varía desde un mínimo de 600 mm en los valles intramontanos de la región norte, hasta un máximo de 2,000 mm al este del municipio de Chinandega, (figura 3).

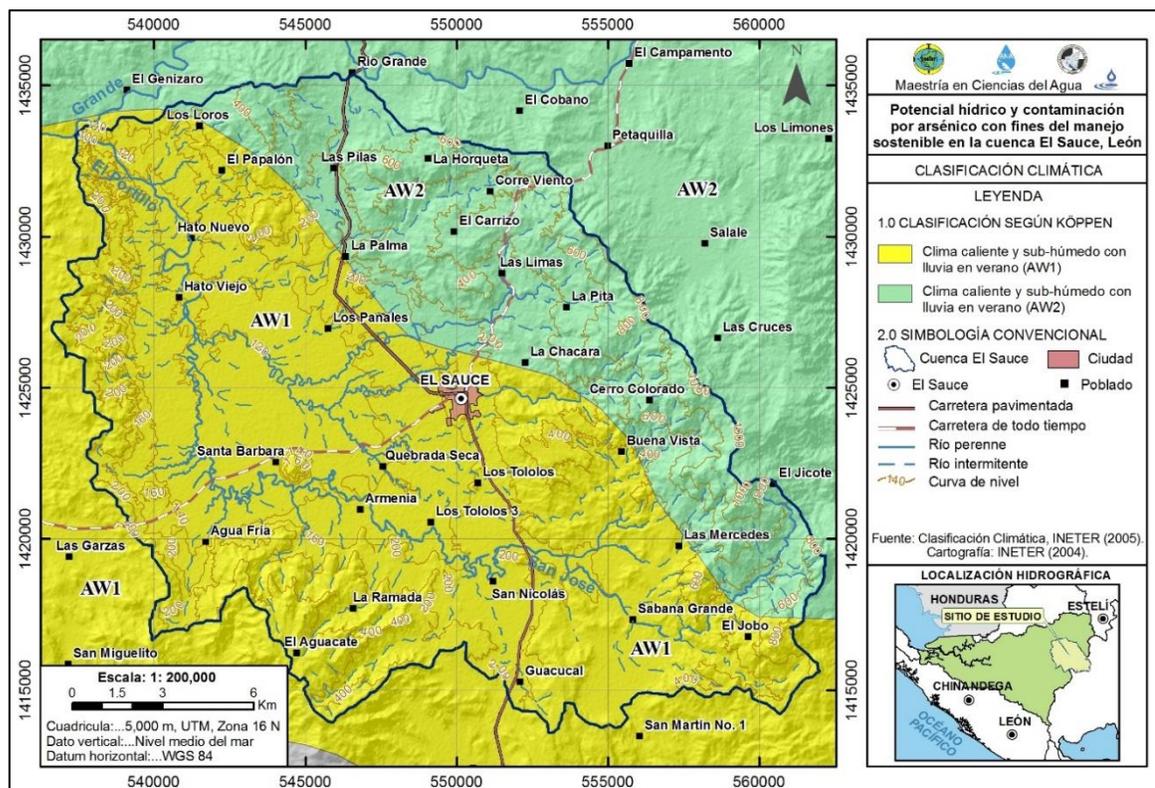


Figura 3. Mapa de clasificación climática de la cuenca El Sauce

2.2 Suelos

En el área de estudio se presentan diversos tipos de suelos, los que fueron obtenidos de INETER et al (2015), identificando al menos cuatro órdenes de suelos que se extienden ampliamente en la cuenca.

Las principales características de los suelos con mayor distribución en la cuenca se describen a continuación:

Molisoles: son suelos minerales con estado de desarrollo incipiente, joven o maduro, de poco profundos a muy profundos, desarrollados a partir de depósitos aluviales, rocas básicas, ácidas, con fertilidad de baja a alta. Presentan un drenaje interno natural de muy pobre a bien drenado, con pendientes del 3 al 10%, relativamente poco profundos, fertilidad media-baja. La textura varía de franco a franco arcilloso, y presenta coloraciones pardas oscuras rojizas, (Ibañez et al, 2010).

Los suelos del tipo molisol, son los que predominan en la cuenca El sauce, representan el 53.68% del área, ubicándose principalmente en gran parte del valle y en la parte alta y norte, ubicados en Río Grande, Las Pilas y Las Palmas, así mismo en la parte noreste de la cuenca, en las localidades de Las Mercedes, Sabana Grande y El Jobo.

Alfisoles: el nombre de este orden se debe a los símbolos químicos Al y Fe que aparecen como predominantes en su desarrollo. Son suelos cuyo régimen de humedad es tal que son capaces de suministrar agua a las plantas mesofíticas durante más de la mitad del año o por lo menos durante más de tres meses consecutivos a lo largo de la estación de crecimiento de las plantas, (Ibañez et al, 2010).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Los suelos alfisoles, ocupan el segundo orden en predominio en la cuenca, representan el 23.39%, se ubican en las partes alta de la cuenca, tanto en la parte noreste y oeste de la cuenca, en las comunidades Las Limas, El Panamá, Buena Vista, Cerro Colorado, Chagüite Grande, La Palmita, entre otras.

Entisoles: son suelos típicos de laderas donde la escorrentía no permite la evolución de los suelos en profundidad a causa de la erosión hídrica. De todos los suelos, estos son los que menos han tenido influencia de los factores formadores puesto que aún no se han desarrollado los cambios necesarios para la formación del suelo, de manera que son desarrollados sobre material parental no consolidado que en general no presentan horizontes genéticos, ni de diagnóstico, (Ibañez et al, 2010).

La profundidad varía de acuerdo con la pendiente, presentan un drenaje de medio a bueno, las texturas varían de arenosas a arcillosas.

Los suelos del tipo entisol representan el 12.87 % del área, se ubican al noroeste de la cuenca, en terrenos con pendiente de ligeramente inclinada a inclinada, no tienen ningún efecto en el interior del valle por encontrarse en zona de descarga. Estos también se encuentran en el sector sur de la cuenca en la localidad El Guacucal.

Vertisoles: son suelos arcillosos propiamente dichos, presentando grietas en alguna estación del año. El material parental lo constituyen sedimentos con una elevada proporción de arcillas o productos de alteración de rocas que las generen, siendo suelos minerales caracterizados por su elevado contenido de arcillas. Son suelos muy compactos en la estación seca y muy plásticos en la húmeda, por lo que el manejo de estos suelos es bastante complicado, (Ibañez et al, 2010).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Dicho orden constituye el 8.50% del área, localizándose principalmente en la zona central del valle, en las localidades de Llano de Santa Bárbara y Llano Palma de Lora, además de encontrarse en el sector sureste de la cuenca en la localidad Llano de Sabana Grande.

Con menor extensión se encuentran los suelos inceptisol y afloramientos rocosos, en conjunto representan el 1.56 % de la superficie de la cuenca, estos se ubican en la parte sureste de la cuenca.

La tabla 2 recopila los diferentes tipos de suelos identificados en la cuenca El Sauce, con sus respectivas superficies.

Tabla 2. Tipos de suelos en la cuenca El Sauce

Orden	Código del orden	Área (km ²)	Área (%)
Molisol	I	197.05	53.68
Alfisol	J	85.85	23.39
Entisol	L	47.23	12.87
Vertisol	F	31.20	8.50
Inceptisol	K	2.50	0.68
Afloramiento rocoso	AR	3.23	0.88

La mayor cantidad de pozos aprovechados en la cuenca se localizan sobre suelos molisoles, el cual, en términos generales favorece la infiltración de la lluvia y recarga al acuífero, debido a la textura del suelo, (figura 4).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

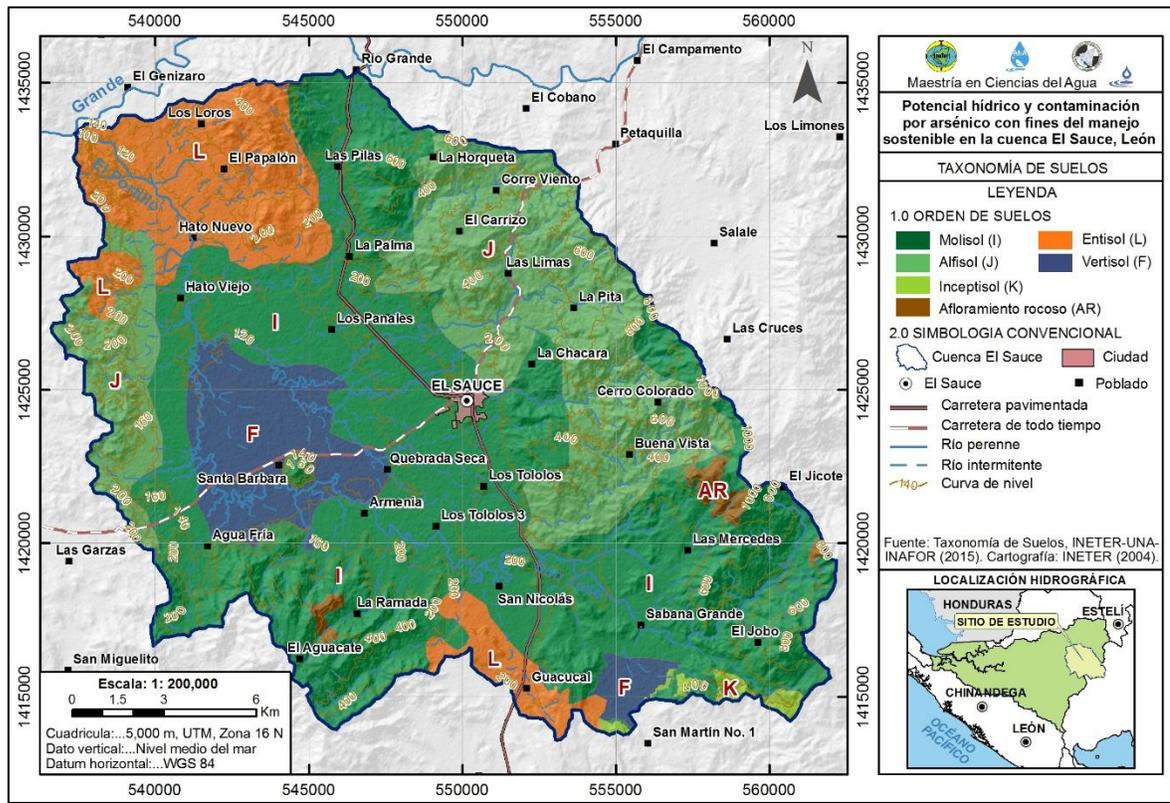


Figura 4. Mapa de órdenes de suelos en la cuenca El Sauce

2.3 Cobertura y usos de la tierra

Fue obtenida con base a INETER et al (2015), identificando al menos ocho coberturas que se extienden en la cuenca. Se describen a continuación los hallazgos de las distintas categorías identificada en la cuenca.

La parte alta de la cuenca El Sauce presenta una marcada homogeneidad en cuanto a las coberturas, ya que el 50.31% de la cuenca está cubierta por vegetación arbustiva. Además, se identifican tacotales que representan el 11.57% del área de la cuenca. De acuerdo a la figura 5, la cobertura por vegetación arbustiva se ubica principalmente al norte, noreste y sureste de la cuenca.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

En cambio, la zona del valle, está cubierta principalmente por dos tipos de coberturas y uso de la tierra, en un primer plano se encuentran los pastizales, que se extienden a lo largo del curso del río El portillo representan el 21.56% de la superficie de la cuenca y en segundo plano los cultivos anuales, compuesto en su mayoría por maíz y frijol, que representan el 8.69% del área de estudio, (figura 5).

Los bosques de coníferas denso son escasos, representan el 4.61% del área total de la cuenca, localizándose principalmente en las partes más alta de la cuenca, hacia al noreste y este.

Las demás categorías de coberturas representan el 3.26% de la superficie de la cuenca. En tabla 3, se presenta la distribución de las coberturas y usos de la tierra en la cuenca.

Tabla 3. Cobertura y usos de la tierra en la cuenca El Sauce

Clasificación	Área (km ²)	Área (%)
Vegetación arbustiva	184.67	50.31
Pasto	79.15	21.56
Tacotal	42.48	11.57
Cultivo anual	31.90	8.69
Bosque de conífera denso	16.92	4.61
Bosque latifoliado denso	8.80	2.40
Ciudades, poblados y caseríos	1.73	0.47
Agua	1.42	0.39

Las coberturas y usos de la tierra con predominio en la cuenca, no contribuyen significativamente a la infiltración de las aguas en los suelos; tanto en la parte alta y baja de la cuenca se identifican considerables áreas sin densa vegetación, a excepción de la zona noreste de la cuenca ubicada en la comunidad El Borbollón,

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

la que corresponden a una de las principales áreas de recarga al acuífero formado en el valle.

Como consecuencia de la tala de árboles generalizado, especialmente en las zonas de mayores pendientes y partes altas de la cuenca, la erosión hídrica y eólica han venido reduciendo la capa superficial fértil de los mejores suelos de laderas existentes, arrastrándola y depositándola en la parte baja de la cuenca.

En la figura 5, se presenta la distribución espacial de las distintas categorías de coberturas y usos de la tierra en la cuenca, según INETER et al (2015).

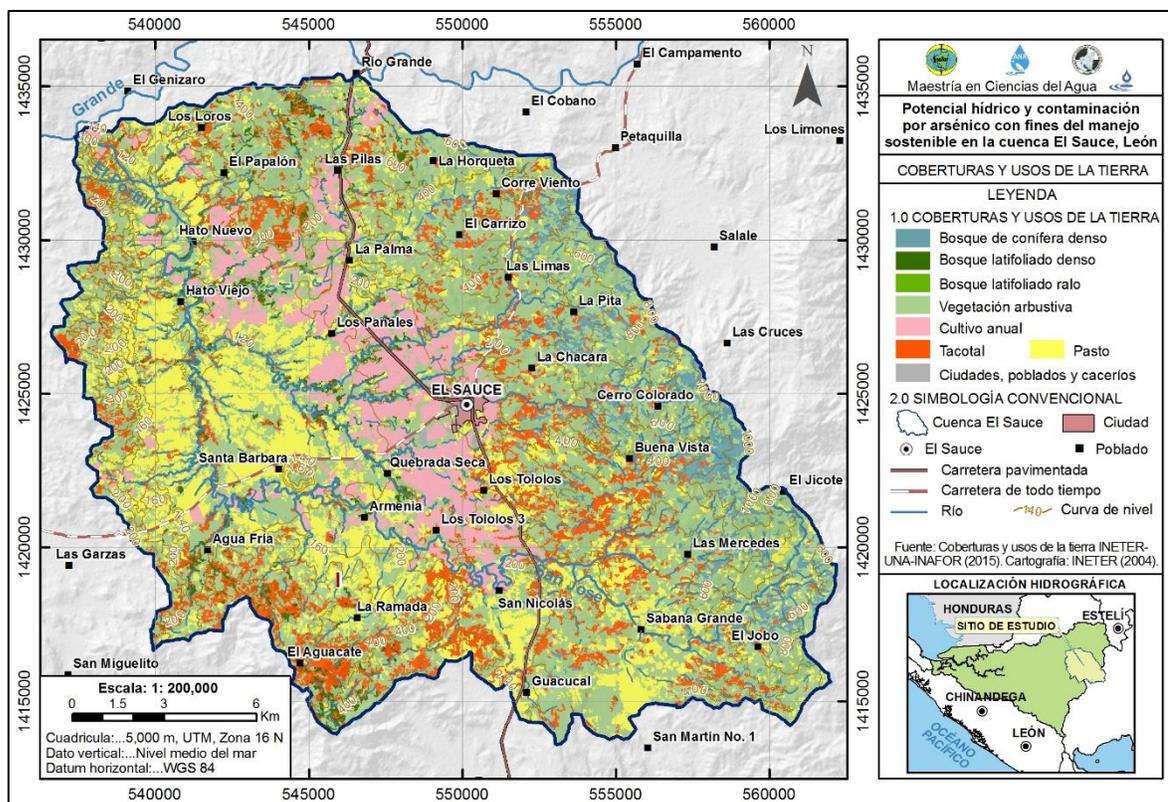


Figura 5. Mapa de cobertura y usos de suelos de la cuenca El Sauce

2.4 Geomorfología

La cuenca El Sauce está situada en las provincias de la Depresión Nicaragüense y Tierras Altas del Interior, (Fenzl, 1989), razón por la cual, se caracteriza por contener dos sistemas topográficos diferentes: la zona de valle, oscila desde los 110 hasta 200 msnm; y la zona montañosa, con una altitud que oscila entre los 200 a 1,125 msnm en su punto más alto, ubicado en el cerro El Jicote.

En la zona montañosa sobresalen colinas de mediana elevación, montañas altas, crestas y valles anchos y profundos, los cuales reflejan principalmente la estructura geológica que desempeña un papel importante en el control de la topografía, (INETER, 2008).

Las elevaciones principales de la cuenca se ubican en la parte este y sureste de la ciudad de El Sauce, donde sobresalen cerro El Jicote 1125 msnm, fila La Joyita 1080 msnm, cerro Coralito 862 msnm y fila El Coyol con 840 msnm, estos y otras estructuras montañosas de menor elevación forman parte del parteaguas de la cuenca.

En cambio, la parte más baja de la cuenca ubicada en dirección noroeste está representada por las elevaciones desde 100 a 400 msnm, la menor elevación correspondiente a la desembocadura del río El Portillo.

En el interior del valle sobresale la estructura cónica, representada por el cerro Santa Bárbara con una elevación de 300 msnm, en el entorno de esta estructura prevalecen áreas de llanos.

De acuerdo a la figura 6, la zona del valle está representada por un relieve plano con pendientes del terreno de plana a ligeramente inclinada (0 – 5%), en cambio en

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

la zona montañosa predominan un relieve montañoso con pendiente del terreno de inclinado a moderadamente escarpado (5 - 30%); con menor distribución se presenta los terrenos de pendiente escarpada (30 - 60%), ubicadas principalmente en zonas adyacentes al cerro El Jicote.

Las pendientes en el área del valle contribuyen a aumentar la infiltración de las aguas en los suelos, en cambio, la mayor parte de las aguas que infiltran en el relieve montañoso, escurre subsuperficialmente a través del sistema de fallas y fracturas hacia al interior del valle.

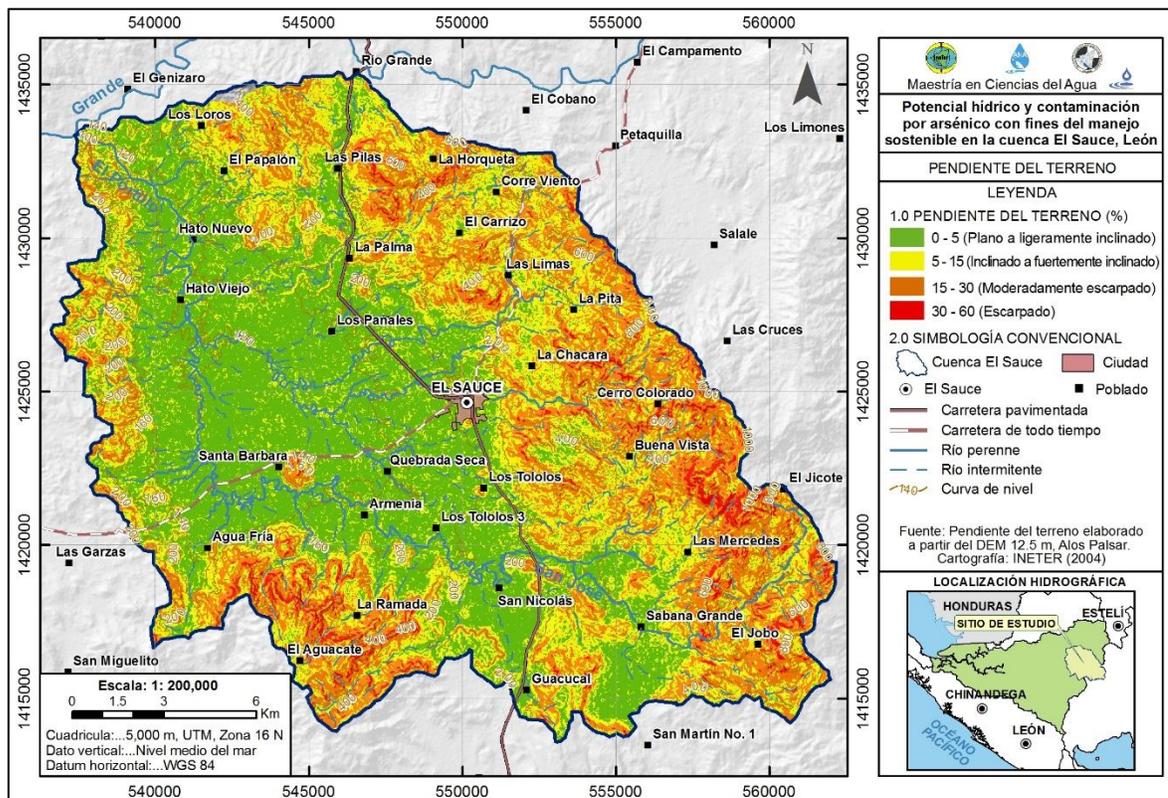


Figura 6. Mapa de pendiente del terreno de la cuenca El Sauce

2.5 Geología

La presente descripción está basada en los mapas del Servicio Geológico Minero (1972), de igual manera, del estudio hidrogeológico realizado en la cuenca por INETER (2008), e incorporando información de campo registrada en julio de 2013.

2.5.1 Unidades geológicas

El área de la cuenca El Sauce, concentra materiales volcánicos ocurridos durante diferentes periodos geológicos, las rocas del periodo Terciario representado por las rocas del Grupo Coyol Superior y sedimentos del Cuaternario indiferenciado (Q), presentando en figura 7.

Se describe las características de las distintas unidades presentes en el área de estudio.

2.5.1.1 Cuaternario indiferenciado

Se trata de sedimentos provenientes de la descomposición de las rocas preexistentes, acumulándose por transporte fluvial (Qal), por deslizamiento (Qc), y depositados *in situ* por efecto de lodo secado por el tiempo, que son los materiales denominados residuales (Qr).

La mayor extensión del valle, está formado por materiales arcillo limoso y limo, como producto de la alteración, erosión hídrica y eólica de las rocas del Grupo Coyol Inferior (dacitas, andesitas e ignimbritas), luego transportados por las corrientes superficiales durante la época lluviosa. Representan el 38.35% de la superficie total de la cuenca.

El Cuaternario indiferenciado formado por aluviones antiguos, de diferente composición, como suelos arcillosos limosos por la degradación de las andesitas al oeste y suroeste de El Sauce, suelos arcillo arenosos por la erosión de las andesitas, ignimbritas y dacitas al sur, sureste y norte de El Sauce, (INETER, 2008).

Hacia el noroeste de El Sauce se encuentran sedimentos arenosos producto de la erosión de las granodioritas. Otra característica de esta meteorización es el contraste de los suelos areno arcillosos claros con los rojizos de las andesitas, esta composición es en áreas que contienen suelos mineralizados (INETER, 2008).

Según INETER (2008), el espesor de los sedimentos del cuaternario oscila aproximadamente entre 3 a 89 m.

2.5.1.2 Rocas del Grupo Coyol

Estas rocas, de edades Plioceno y Mioceno, están distribuidas en la mayor parte del área de la cuenca, cubriendo el 54.83 % de esta. Esta formación está dividida en Coyol Superior e Inferior.

Las rocas del Coyol inferior (Tmc) representan el 50.83 % del área total de la cuenca, predominando las rocas dacitas, ubicadas hacia el noreste, este y sureste de El Sauce, seguidas de las andesitas e ignimbritas dacíticas, ambas están en contactos con los sedimentos del cuaternario.

En el interior del valle aflora la estructura cónica Cerro Santa Bárbara, siendo la de mayor elevación, alcanzando los 300 msnm, así mismo, en la parte sur y noroeste de la ciudad El Sauce, se identifican afloramientos de rocas del Grupo Coyol Inferior.

Las rocas del Grupo Coyol Superior (Tpc), están representada por lavas andesíticas, ubicadas en la parte sur y sureste de la cuenca, encontrándolas en las partes altas a partir de las elevaciones de 300 a 400 msnm; representa tan solo el 4% de área total de la cuenca.

2.5.1.3 Intrusivo ácido (Tia)

Es una formación rocosa intrusiva que se ha formado por proceso endógeno y por efecto de presión interna, está surgiendo a la superficie, denominada Granodiorita que está instruyendo a las rocas del Grupo Coyol Inferior. Estas rocas intrusivas comprenden estructuras en forma de diques alargados, anulares y apófisis. Representan el 6.83% de la superficie de la cuenca.

En la cuenca las rocas intrusivas ácidas, afloran en forma de batolito masivo, afectando a las rocas del Grupo Coyol Inferior andesítico y dacítico, en el extremo noreste y norte de la cuenca, en las localidades de Chagüite Grande, El Papalón, Los Lirios, Los Loros, Los Encuentros, (INETER, 2008).

Por otra parte, con el levantamiento de campo se identificaron otras localidades, donde los intrusivos ácidos afloran, entre estas se encuentran, los afloramientos ubicados en la localidad de Los Rascaderos, así mismo, se encuentran en la parte alta y sureste de la cuenca, en el lineamiento conformados por los cerros Alaniz, Valencia El Papalón y El Coralito.

Generalmente las rocas son holocristalinas de textura granular hipidiomórfica de grano grueso, medio a fino y color variable desde gris claro, oscuro a negro y rosado, (INETER, 2008).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

En tabla 4, se presentan las unidades geológicas antes descritas, litología y las áreas que ocupan tanto, los sedimentos del cuaternario como los afloramientos de las rocas terciarias.

Tabla 4. Distribución de las unidades geológicas en la cuenca El Sauce

Formación	Nomenclatura	Litología	Área (km ²)	Área (%)
Cuaternario Indiferenciado	Q	Sedimentos arcillo limosos, limos, arenas, guijarros	140.76	38.35
Coyol Inferior	Tmc	Dacitas, andesitas e ignimbritas	186.58	50.83
Coyol Superior	Tpc	Lava andesíticas	14.67	4.00
Intrusivo ácido	Tia	Granodiorita	25.06	6.83

2.5.2 Estructuras geológicas

La localización del área de estudio en parte de la depresión nicaragüense y en el margen oeste de las tierras altas del interior, hace que se presente un terreno sumamente fracturado.

Las estructuras predominantes en el área de estudio son las inclinaciones, fallamientos y fracturamientos, algunas son inferidas de las evidencias topográficas, geomorfológicas, cambios en buzamientos y por desplazamientos de rocas apreciables en las fotografías aéreas y otras confirmadas en el campo, (INETER 2008).

Las fallas de mayor magnitud tienen orientación predominante de noroeste-sureste, algunas se presentan en dirección noreste -suroeste y de norte a sur. La mayoría de las fallas son normales y su desplazamiento vertical se manifiesta por los numerosos escarpes sobresalientes, (INETER, 2008).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

INETER (2008), por geofísica confirma la existencia de fallas en el valle las cuales están cubiertas por los sedimentos indiferenciados y que tienen orientación noroeste - sureste y noreste - suroeste.

El fracturamiento intenso en las rocas dacíticas del Grupo Coyol Inferior ubicado al noreste, y este de la cuenca, favorece la infiltración del agua, (figura 7).

En el interior del valle prevalecen las fallas cubiertas, misma que ha sido rellenada con los sedimentos de cuaternario, en cambio en el medio fracturado predominan las fallas comprobadas, supuestas y las fracturas, (figura 7).

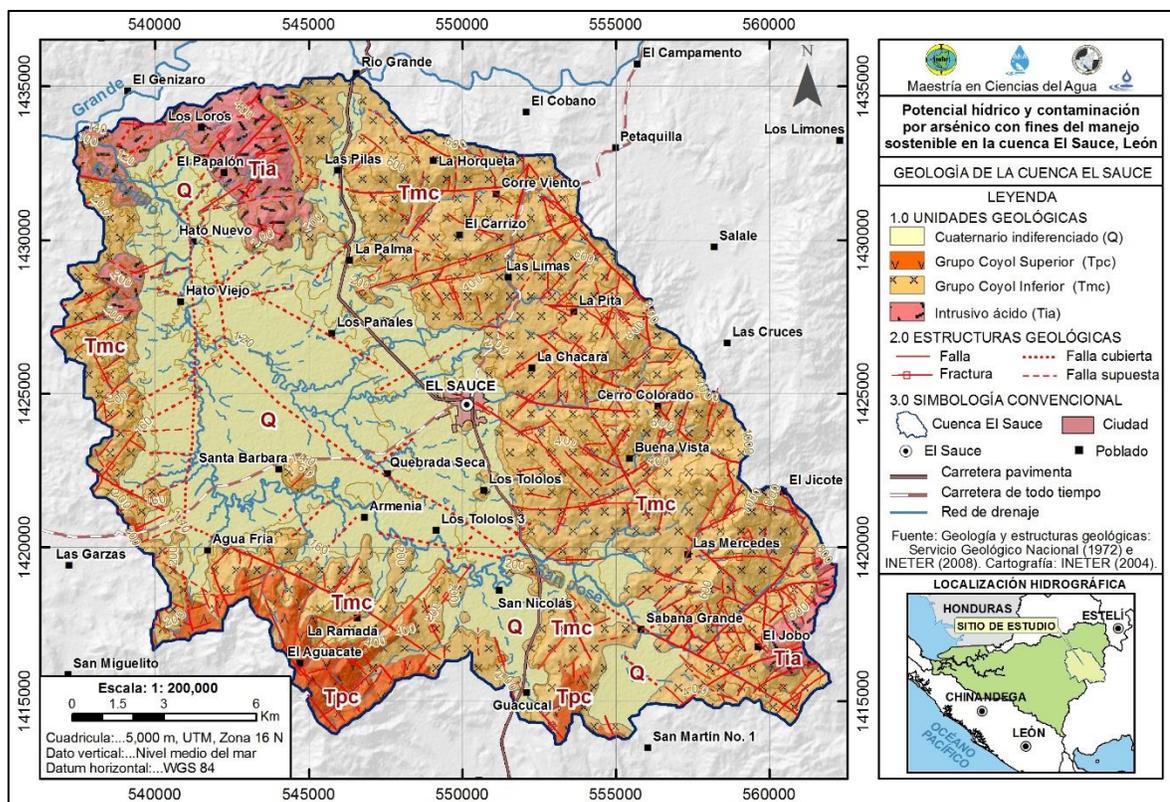


Figura 7. Mapa de unidades geológicas de la cuenca El Sauce

2.6 Unidades hidrológicas de la cuenca

De acuerdo a la metodología Pfafstetter la cuenca El Sauce delimitada a nivel 8, compuesta por 8 unidades hidrológicas, de estas 3 clasificadas como cuenca y 5 como intercuenas, (INETER et al, 2014).

El principal tributario del río El Portillo, es el río Quebrada Seca (95337684), este desciende de las laderas de la fila La Joyita a una elevación de 1,041 msnm. Dicha unidad posee una superficie de 116.69 km² la cual representa el 31.79% del área total de la cuenca El Sauce.

El segundo tributario de mayor importancia es el río La Palma (95337682), la que posee una superficie de 48.20 km² y representa el 13.13% de la superficie de la cuenca.

El río Las Mercedes (95337687), delimitada como intercuenca, es la de mayor aporte en la parte alta y sureste de la cuenca, ya que está, es parte de las zonas de recargas de la cuenca que aún posee áreas reforestadas, conservando las quebradas los flujos de agua todo el año, los que se infiltran al ingresar al acuífero poroso.

Cabe mencionar, que hay unidades con áreas mayores a la del río La Palma (95337682) y Las Mercedes (95337687), no obstante, la red de drenaje de estos, está representada por ríos de menor longitud y en la mayoría de los casos, de régimen intermitente y efímero.

En tabla 5, se presenta la superficie que ocupan las unidades hidrológicas delimitadas a nivel 8, que se encuentran circunscritas a la cuenca El Sauce.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Tabla 5. Unidades hidrológicas de la cuenca El Sauce a nivel 8

Unidad hidrológica	Nivel 8	Área (km ²)	Área (%)
1	95337681	38.69	10.54
2	95337682	48.20	13.13
3	95337683	6.63	1.81
4	95337684	116.69	31.79
5	95337685	73.09	19.91
6	95337686	24.83	6.76
7	95337687	18.24	4.97
8	95337689	40.70	11.09
Total		367.07	100.00

Fuente: INETER et al, 2014

En la figura 8 se presenta la distribución de las unidades hidrográficas delimitadas a nivel 8 bajo la metodología Pfafstetter que se encuentran circunscritas en la cuenca El Sauce.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

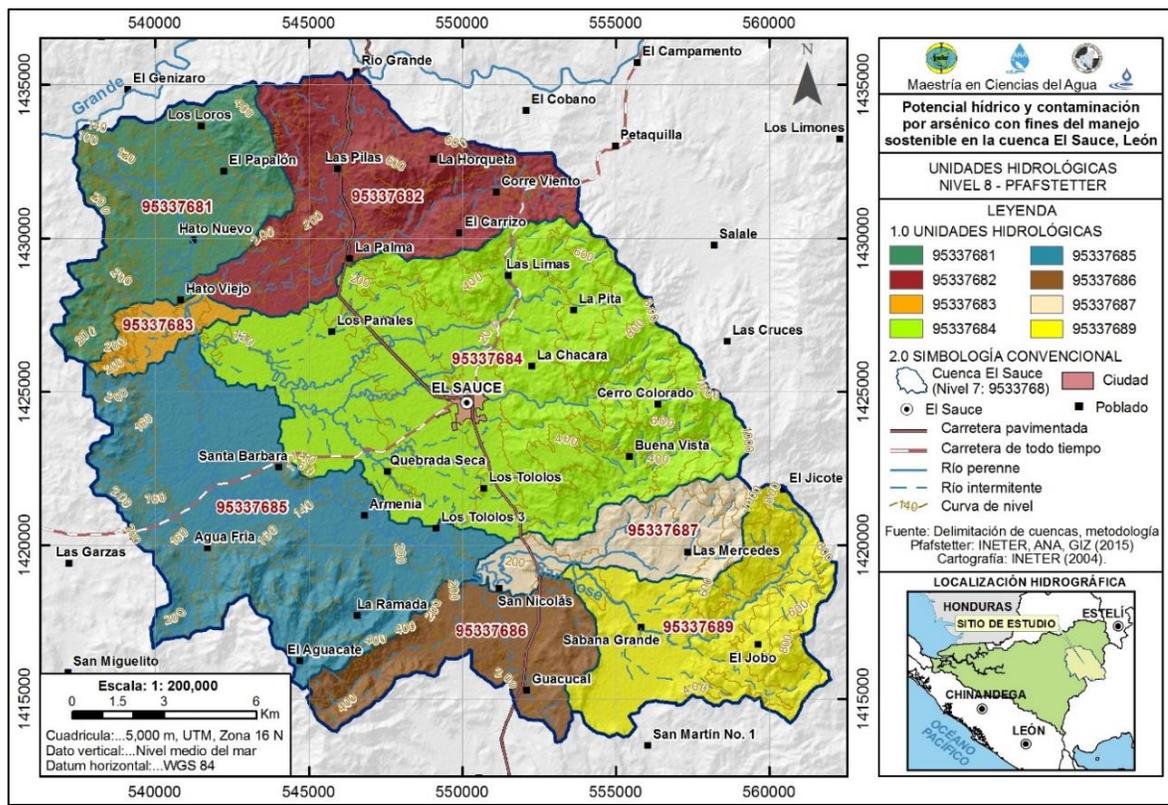


Figura 8. Mapa de unidades hidrológicas a nivel 8 de la cuenca El Sauce

2.7 Hidrogeoquímica

Comprende la compilación de los resultados de INETER (2008) correspondientes a la génesis y características físico-químicas del agua subterránea.

2.7.1 Tipos hidrogeoquímicos

La génesis del agua fue evaluada principalmente en la zona del valle, donde el tipo hidrogeoquímico predominante en las aguas subterráneas del acuífero El Sauce, es del tipo bicarbonatadas cálcicas ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$) y en un segundo plano se ubican las bicarbonatadas sódicas ($\text{HCO}_3\text{-Na}$), lo cual se puede observar en la figura 9.

Las aguas bicarbonatadas cálcicas se ubican ampliamente en la parte media y baja del valle, y en menor extensión en la parte altas, mientras las bicarbonatadas sódicas se localizan en la parte sureste y en las inmediaciones de la parte media - alta del valle, además de ubicarse en las partes norte y alta.

Dentro del valle se identifican otros tipos de aguas, de manera puntual, como son los tipos hidroquímicos bicarbonatadas sódicas magnésicas / bicarbonatadas magnésicas sódicas y las bicarbonatadas cloruradas cálcicas sódicas.

Las aguas bicarbonatadas son de infiltración reciente, provenientes de la recarga natural directa de las lluvias, las que se infiltran hasta el nivel del acuífero, estas con poco tiempo de recorrido en el acuífero.

El predominio de los bicarbonatos se debe principalmente a la disolución de CO_2 atmosférico presente en el agua de lluvia, mientras la concentración de Na^+ y Ca^{2+} obedecen a las características del medio geológico de la cuenca.

Por otra parte, INETER (2008), determinó un valor puntual de agua del tipo sulfatada sódica, determinado en un manantial que se ubica en el medio fracturado, en el sector sureste de la cuenca.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

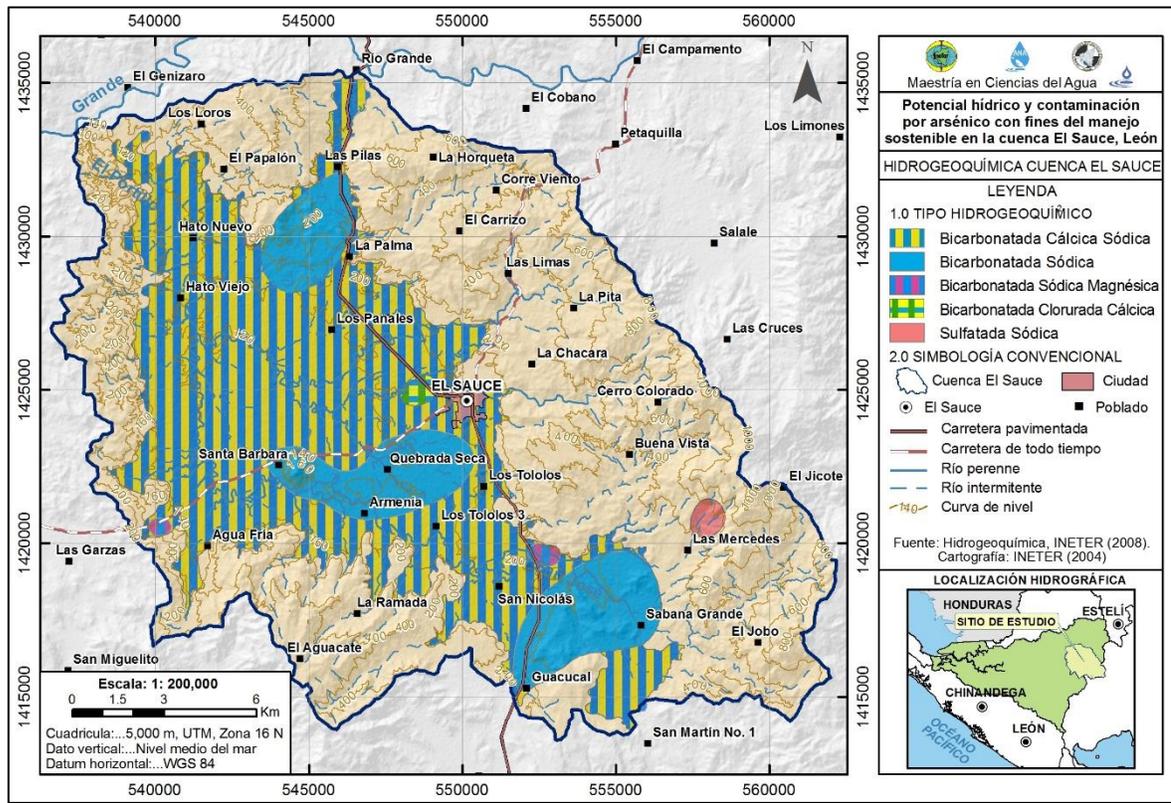


Figura 9. Mapa hidrogeológico de la cuenca El Sauce

2.7.2 Características químicas y físicas

La calidad del agua se determinó con los resultados fisicoquímicos obtenidos en el muestreo realizado en mayo de 2006 por INETER (2008).

Estos fueron registrados para 25 pozos, de estos 22 perforados, 1 excavado y 3 mananciales, obteniendo de estos la concentración mínima, máxima y promedio de los 25 sitios registrados, los cuales fueron comparados con la norma de calidad de agua para consumo humano (CAPRE).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Tabla 6. Concentraciones mínimas, máximas y promedios de aniones y cationes

Parámetro	Aniones						Cationes				
	CO ₃	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	F	Ca ₂	Mg ₂	Na	K	Fe ₂
Mínimo (mg/l)	0.00	0.00	1.94	3.77	0.50	0.01	0.79	0.53	20.49	0.54	0.05
Máximo (mg/l)	0.00	311.64	78.67	52.22	42.50	4.30	38.66	26.18	196.90	7.30	0.40
Promedio (mg/l)	0.00	180.43	17.73	11.73	6.01	0.52	21.48	9.17	53.51	2.49	0.08
VR CAPRE (mg/l)	-	-	25	25	25	-	100	30	25	-	-
VMA CAPRE (mg/l)	-	-	250	250	50	0.7	-	50	200	10	0.3

Fuente: INETER ,2008

2.7.2.1 Aniones

De acuerdo a los resultados del muestreo realizado en mayo de 2006 por INETER (2008), los carbonatos se encuentran ausente, mientras los bicarbonatos presentan un valor promedio y máximo de 180.43 y 311.64 mg/l, respectivamente, las concentraciones máximas de este anión, es debido a su estrecha relación con el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico.

Las concentraciones máximas de sulfatos, cloruros y nitratos no sobrepasan el valor máximo admisible de la norma CAPRE, presentando la menor concentración los nitratos con 42.50 mg/l y la mayor los sulfatos con 78.67 mg/l, en cambio la concentración máxima de los fluoruros de 4.30 mg/l, sobrepasa el valor máximo admisible de la norma para consumo humano.

2.7.2.2 Cationes

Las concentraciones máximas de calcio, magnesio y sodio no sobrepasan el valor máximo admisible de la norma CAPRE, de estos el sodio presenta la mayor concentración con 196.90 mg/l, próxima al valor máximo admisible, en cambio la menor concentración la presenta el magnesio con 26.18 mg/l.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

El alto contenido del sodio está asociado al medio geológico, por el ataque de feldespatos y silicatos, aunque no se descarta la aportación de las primeras aguas de lluvia.

En cuanto a las concentraciones máximas determinadas en los cationes potasio y hierro, el primer catión presenta concentraciones inferiores al valor máximo admisible de la norma CAPRE, en cambio la concentración determinada para el hierro de 0.40 mg/l sobrepasan levemente el valor máximo admisible por la norma.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Para la caracterización del medio físico de la cuenca El Sauce, se realizaron las siguientes etapas de trabajo.

3.1 Etapa preliminar

Consistió en la obtención y selección de información, relacionada a actividades de gabinete: recopilación bibliográfica, asistencia a instituciones, entre estas, la alcaldía municipal de El Sauce, INETER y ENACAL.

La información recopilada, procesada y analizada tiene relación con datos demográficos, producción pecuaria, datos meteorológicos, edafológica, geológica, hidrológica, e hidrogeológica; de esta última, se obtuvo la base de datos de transmisividad, capacidad específica del acuífero El Sauce, de la dirección de Hidrogeología del INETER.

3.2 Etapa de investigación de campo

Esta comprende las actividades desarrolladas en campo y de laboratorio, necesarias para caracterizar y conocer el comportamiento hidrológico, hidrogeológico e hidrogeoquímico en la cuenca.

3.2.1 Levantamiento geológico

Con el fin de identificar las distintas formaciones en la cuenca, se realizó un reconocimiento de la geología superficial *in situ* en julio de 2013, tomando como base la geología del estudio hidrogeológico del acuífero, (INETER, 2008); así mismo, se recurrió al mapa del Servicio Geológico Minero de Nicaragua (1972).

Los sitios de mayor interés en el levantamiento de campo fueron dirigidos a zonas de afloramientos, contactos, rasgos litoestratigráficos y estructuras relevantes.

En las figuras 10 y 11 se ilustran características de las formaciones identificadas en el levantamiento geológico.



Figura 10. Rocas Grupo Coyol Inferior, Los Rascaderos. Coordenadas: N 1427620 – E 538639. Elevación 211 msnm

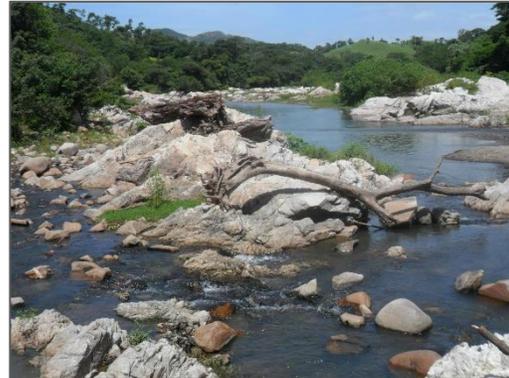


Figura 11. Afloramiento de rocas intrusivas ácidas río El Portillo en Los Encuentros. Coordenadas: N 1433370 - E 537435. Elevación 116 msnm

3.2.2 Hidrología

Las actividades de campo correspondiente a esta componente, consistieron en la realización de aforos, realizado en época seca y lluviosa de los meses de mayo y octubre de los años 2013 y 2017, así mismo en enero de 2014, estos permitieron determinar los caudales del río principal y en tributarios; además se evaluó la relación agua superficial - agua subterránea en zonas del acuífero poroso.

3.2.2.1 Monitoreo de caudales en ríos

Con el propósito de evaluar la dinámica de los ríos en la cuenca El Sauce, se establecieron cinco (5) sitios de aforos, de estos tres (3) se ubican en el río principal, (tabla 7).

Los tres sitios de aforos ubicados en el río principal (A1, A2, A3), el primero ubicado a 100 m de la confluencia con el río Grande, permitió determinar el caudal de salida de la cuenca, el punto 2 ubicado en la parte baja a media y el tercer sitio ubicado en la parte alta. Con respecto a los otros dos sitios de aforos, estos se distribuyeron en los tributarios principales del río El Portillo: La Palma (A4), Quebrada Seca (A5).

Tabla 7. Sitios de aforos en la cuenca El Sauce

ID	Sitio	Río	Coordenadas		Levantamiento de aforo		
			Este	Norte	abr. y oct. de 2013	ene-14	abr. y oct. de 2017
A1	Los Encuentros	El Portillo, parte baja	537700	1433277	✓	✓	✓
A2	Llano Palma de Lora	El Portillo, parte media	541251	1425838	✓	✓	✓
A3	San José	San José	553500	1419452	✓	✓	✓
A4	Eduardo Contreras	La Palma	542296	1428341	✓	✓	✓
A5	La Esperanza	Quebrada Seca	542971	1426727	✓	✓	✓

Los aforos se realizaron en abril, a fin de cuantificar caudales base, por otro lado, también se realizó aforo en el mes de mayor pluviosidad, octubre. La dinámica de los ríos fue obtenida para los años 2013 y 2017 de los meses antes mencionados. No obstante, la mayoría de los ríos no presentan flujos base al final del periodo seco, por lo que, fue necesario realizar aforos en el mes de enero, realizándolos en el 2014.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Para las mediciones de velocidad del flujo, se utilizó el molinete Gurley Pígameo modelo 625 para ríos de poco caudal y el molinete *Scientific Instruments Inc.* modelo tipo AA, para los de mayor caudal; a partir de estos instrumentos fue posible estimar los volúmenes de agua que transitan en las distintas secciones de aforos consideradas, (figuras 12 y 13).



Figura 12. Aforo en río La Palma (A4) en Eduardo Contreras, enero 2014. Coordenadas: N 1428341 – E 542296. Elevación 128 msnm



Figura 13. Aforo en río San José (A3) en San José, enero 2014. Coordenadas: N 1419452 – E 553500. Elevación 192 msnm

En la figura 14, se presenta la distribución espacial de los sitios de aforos, tanto en época seca y lluviosa de 2013 y 2017, donde la mayor parte de estos se concentran en el interior del valle.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

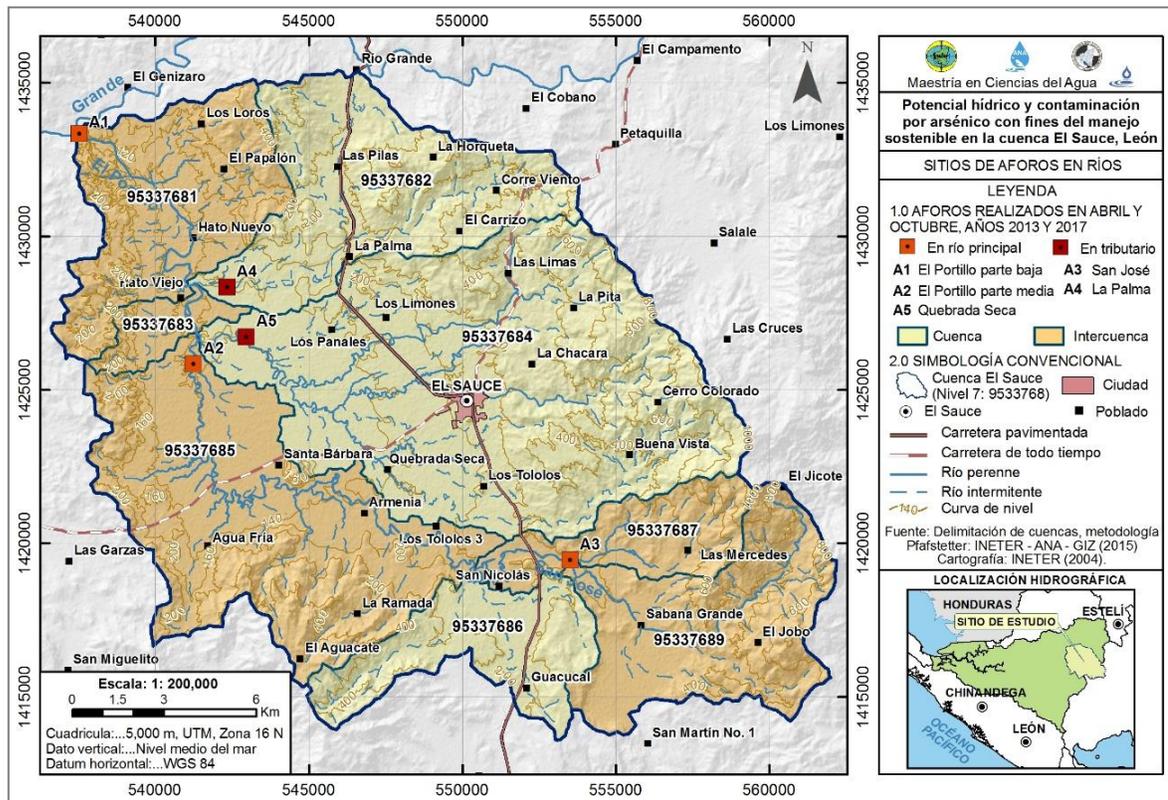


Figura 14. Mapa de sitios de aforos en la cuenca El Sauce

3.2.3 Hidrogeología

Para la evaluación de esta componente se estableció red piezométrica, siendo objeto de monitoreo, permitiendo valorar la dinámica de las aguas subterráneas en el tiempo; además, se realizaron pruebas de infiltración con el fin de presentar una zonificación de áreas de recarga.

3.2.3.1 Monitoreo de niveles de agua

Se estableció una red de monitoreo compuesto de 65 sitios, de estos 28 pozos perforados, 2 piezómetros y 37 pozos excavados, de los cuales se registró el nivel estático del agua en el periodo seco y lluvioso; en otros casos dinámicos, cuando

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

los pozos se encontraban operando; las mediciones de niveles se obtuvieron con sonda luminosa, estas se realizaron en abril y octubre del año 2013, actualizando los niveles para los meses antes descritos en el 2017.

La red se estableció con base a registro de inventario de pozos realizado por INETER (2008), algunos pozos excavados fueron sustituido por pozos perforado que se construyeron posteriormente cuando se llevó a cabo el inventario realizado por INETER en diciembre de 2005, por otro lado, se agregaron pozos en sitios de interés,

Se obtuvo información de los pozos perforados y excavados a través de encuestas a los diferentes actores sociales, que aprovechan el recurso, así como datos de profundidad de estos, inventario de uso y consumo para cuantificar la extracción existente en el acuífero, siendo de mayor interés los pozos perforados constituidos como CAPS, así como los de ENACAL, (figuras 15 y 16).



Figura 15. Medición de NEA en época seca, PP13, San Nicolás. Coordenadas: N 1419534 - E 550158. Elevación 164 msnm



Figura 16. Medición de NEA en época lluviosa, PP14, San Nicolás. Coordenadas: N 1418639 - E 550881. Elevación 169 msnm

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

En la figura 17, se presenta la distribución espacial de los 67 sitios que conforman la red piezométrica, estos ubicado principalmente en el interior del valle y con menor distribución de sitios en zonas de laderas.

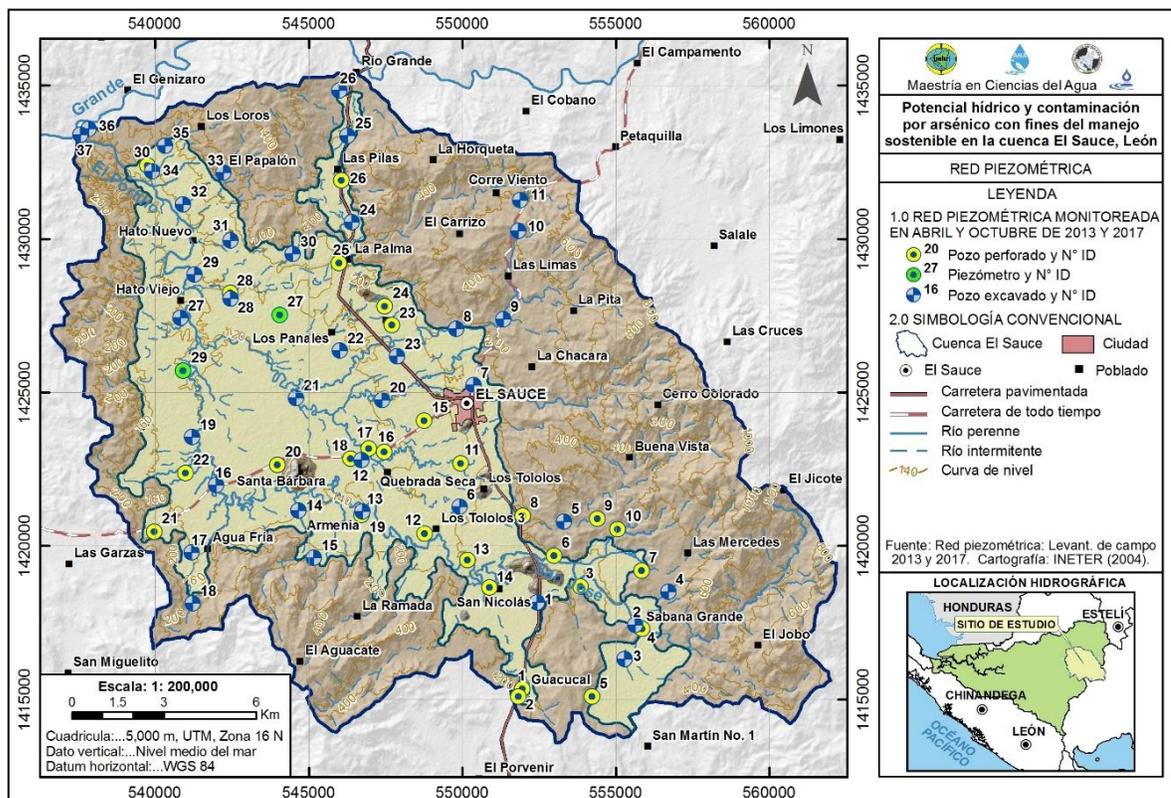


Figura 17. Mapa de red piezométrica en la cuenca El Sauce

3.2.3.2 Pruebas de infiltración

Con el objetivo de valorar la distribución espacial de la infiltración de las aguas en los suelos se realizaron dieciséis (16) ensayos por el método de doble anillos o infiltrómetro, realizándolas en la época seca (enero de 2014). La selección de los sitios se efectuó de acuerdo al tipo de suelo, pendiente, así mismo, se tuvo en

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

cuenta la distribución espacial de estos, esta última condicionada por las rutas de acceso *in situ*.

Los ensayos de infiltración, se realizaron en un tiempo de 4 a 6 horas; del total de pruebas, siete (7) se desarrollaron en el interior del valle (terreno plano a ligeramente inclinado), tres (3) en sitios adyacentes a zonas de laderas y seis (6) en zonas de laderas o de montañas. También se determinó la textura del suelo con una prueba rápida de campo (prueba de manipulación), así mismo, se identificó la cobertura predominante en el entorno del área donde se desarrolló el ensayo, (figuras 18 y 19).



Figura 18. Prueba de infiltración PI3 en zona del valle, Esquipulas. Coordenadas: N 1421468 – E 548318. Elevación 156 msnm



Figura 19. Prueba de infiltración PI13 en zona de laderas, El Guayabo. Coordenadas: N 1422533 – E 555941. Elevación 403 msnm

En la figura 20 se presenta la distribución espacial de los ensayos de infiltración realizado en la cuenca El Sauce empleando el método de doble anillos o infiltrómetro.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

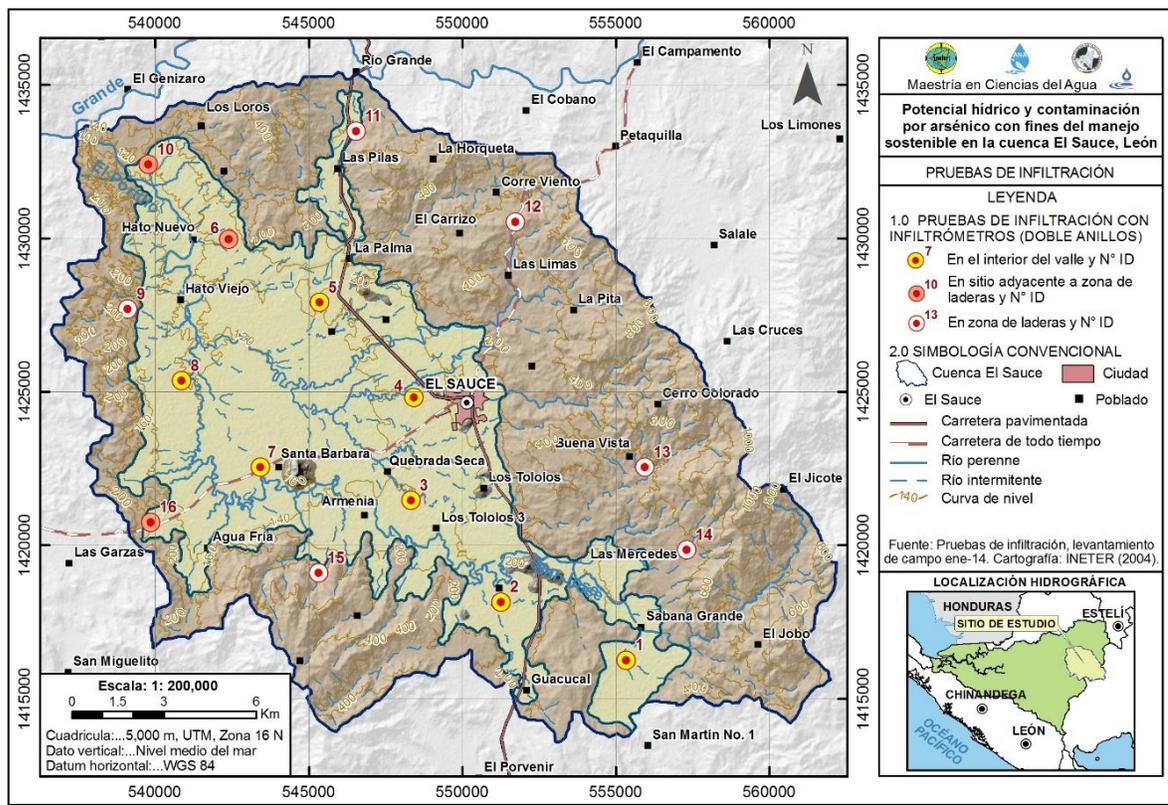


Figura 20. Mapa de pruebas de infiltración en época seca (enero 2014)

3.2.4 Hidrogeoquímica

Comprendió la medición de parámetros físico-químicos de campo y la realización de dos campañas de muestreo para evaluar contaminación por arsénico.

3.2.4.1 Medición de parámetros fisicoquímicos *in situ*

La medición de parámetros físicos-químicos del agua se realizó con el objetivo de obtener una valoración de la calidad de las aguas e identificar si existen indicios de contaminación por arsénico en la cuenca de estudio.

Los parámetros de campo registrados fueron: temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto y potencial redox, a la red de pozos establecida, se llevó a cabo en los meses de abril y octubre de 2013; a excepción del potencial redox que fue registrado únicamente en la época lluviosa, (figura 21).

3.2.4.2 Muestreo de arsénico en aguas subterráneas y superficiales

Para determinar las posibles afectaciones por arsénico total, se realizaron dos campañas de muestreo simple, la primera realizada en octubre de 2013, en esta se consideraron 12 sitios, de los cuales tres (3) corresponden a aguas superficiales (río principal), ocho (8) a pozos perforado y uno (1) a pozo excavado.

La segunda campaña de muestreo, realizada en marzo de 2014, correspondiente al periodo de estiaje, en esta se aumentó el número de muestras, obteniendo un total de diecinueve (19) sitios, de estos dos (2) correspondientes a agua superficiales (río principal), catorce (14) pozos perforados y tres (3) a pozos excavados.

El aumento de los sitios de muestreo en la segunda campaña se estableció con el objetivo de valorar la pluma de contaminación del arsénico de los sitios que presentaron mayor afectación en la primera campaña de muestreo, realizando muestreos aguas abajo a los sitios ya referidos.

En el muestreo de agua subterránea, se consideró principalmente pozos perforados, debido que poseen mayor espesor captado en el acuífero; aprovechando flujos de aguas profundo; por otra parte, la mayoría de estos operan como CAPS, garantizando el suministro de agua a través de red de agua potable a las comunidades del entorno, siendo de interés para la población beneficiada, (figura 22).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León



Figura 21. Medición de parámetros fisicoquímicos de campo, AS-3, Río San José, en San José. Coordenadas: N 1419452 – E 553500. Elevación 192 msnm



Figura 22. Toma de muestra de agua para arsénico en PP28, La Laguneta / Eduardo Contreras. Coordenadas: N 1428239 – E 542440. Elevación 130 msnm

En tablas 8 y 9 se presentan los sitios de muestreo seleccionado por campaña de muestreo.

Tabla 8. Sitios muestreados en agua superficial, para la colecta de muestras de arsénico por campaña de muestreo

Campaña	AS-1	AS-2	AS-3
oct-13	O	O	O
mar-14	O	O	Ø

AS: Agua superficial (río) O: Sitio muestreado Ø: Sitio no muestreado

Tabla 9. Sitios muestreados en agua subterránea, para la toma de muestras de arsénico por campañas de muestreo

CM	PP 4	PP 3	PP 11	PE 38	PP 31	PP 13	PP 12	PP 17	PP 18	PP 20	PE 39	PP 22	PP 24	PE 40	PP 26	PP 28	PE 32	PP 30
oct-13	O	Ø	O	Ø	Ø	O	Ø	O	Ø	O	Ø	Ø	O	Ø	O	O	O	Ø
mar-14	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	Ø	O

PP: Pozo perforado

PE: Pozo excavado

O: Sitio muestreado

Ø: Sitio no muestreado

El único pozo excavado (código PE32) considerado en la primera campaña de muestreo fue sustituido en la segunda campaña, por el PP30, el cual corresponde a un pozo recién perforado, estos distan entre sí a 1,700 m, (anexo 10.1).

Las muestras fueron ingresadas al laboratorio de Contaminantes Metálicos del CIRA/UNAN-Managua para su respectivo análisis. Cabe mencionar que estos análisis se realizaron siguiendo lo establecido en el Método Estándar para Análisis de Agua Natural y Residual (*Standard Method Examinations Water y Waters, edition # 22.2012*). Estos análisis cumplen con todos los estándares de calidad para asegurar la confiabilidad de los resultados.

En la figura 23, se presenta la distribución espacial de los sitios muestreados, tanto en época lluviosa de 2013 y seca de 2014, donde la mayor parte de estos se concentran en el interior del valle.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

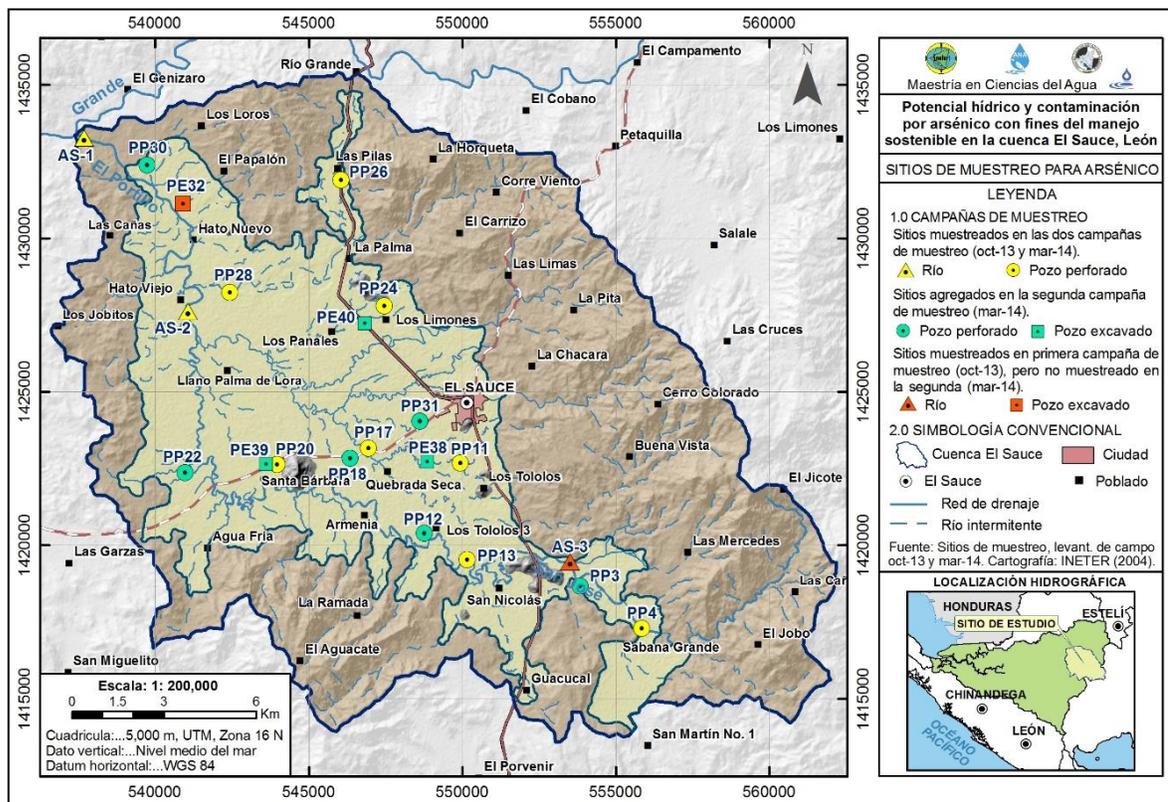


Figura 23. Mapa de sitios de muestreo en época lluviosa (oct-13) y seca (mar-14)

3.3 Etapa de procesamiento de datos e interpretación de información

En esta última etapa, se integraron los resultados de la primera y segunda etapa, de esta, se incluyeron los aspectos siguientes:

3.3.1 Aspectos socioeconómicos

3.3.1.1 Población en cuenca El Sauce

La alcaldía de El Sauce realizó un censo municipal de población en 2007, en el que fue proyectado hasta el 2017, empleando el método geométrico y considerando la tasa de crecimiento poblacional del periodo 2005 – 2020, presentada en el VIII censo de población de 2005, publicado por INIDE (2008); por consiguiente, se tomó

como población base la proyectada al 2017, obteniendo la población de 2018, con el método antes descrito, y con una tasa de 0.7%, estimada a partir de la población municipal reflejada en el VIII censo de población de 2005.

3.3.1.2 Producción pecuaria en la cuenca El Sauce

El censo municipal realizado por la alcaldía El Sauce en 2007, registró la producción de ganado bovino, este se consideró como producción base para proyectarlo a 2018, empleando el método geométrico. La tasa de crecimiento fue estimada a partir de los datos del IV Censo Nacional Agropecuario de Nicaragua, ciclo agrícola 2010/2011 y III Censo Nacional Agropecuario 2001, determinado una tasa de producción de 4.9%.

3.3.2 Selección de datos meteorológicos

Los datos de meteorológicos se obtuvieron a través de la base de datos meteorológica de INETER, complementados con datos CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*), indistintamente de la variable a analizar, se tomó una serie de 15 años, correspondiente al periodo 2004 – 2018, para ello, se consideraron estaciones pluviométricas (PV) y una estación meteorológica principal (HMP).

Los datos CHIRPS combinan datos de estaciones meteorológicas junto a estimaciones de precipitación basadas en satélites de la NASA y NOAA.

3.3.2.1 Precipitación

Para la valoración de este parámetro se seleccionaron un total de 5 estaciones pluviométricas, de estas cuatro ubicadas en el interior de la cuenca y una fuera de esta, considerando un periodo de 15 años, correspondiente del 2004 – 2018, de los cuales los primeros 11 años fueron obtenidos de la base de datos del INETER, y los últimos 4 años (2015-2018), de los datos globales CHIRPS, que dispone de datos mensuales de precipitación desde hace más de 30 años, con una resolución espacial de 0.05 grados (5.5 km aproximadamente).

Se seleccionó un periodo de 15 años debido que las estaciones tenían un registro continuo a partir del 2001 hasta el 2014, no obstante, para el análisis de esta variable se partió del 2003; por otra parte, se utilizaron los datos CHIRPS porque el INETER no contaba con los registros de los años 2015 - 2018.

Cabe mencionar que las estaciones consideradas fueron instaladas por INETER en 1997, sin embargo, desde 1998 – 2000, estas no poseen registros, siendo habilitadas hasta 2001. Por otro parte, 15 años de registros se consideran representativo para valorar la dinámica de las aguas subterráneas en un acuífero somero, como lo es el caso de estudio.

El registro pluviométrico de las distintas estaciones utilizadas permitió generar mapa de isoyetas y describir el comportamiento de las precipitaciones en la cuenca. Las estaciones utilizadas se presentan en tabla 10.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Tabla 10. Estaciones pluviométricas ubicadas dentro y en el entorno de la cuenca

No.	Código	Nombre	Este	Norte	Elev. (msnm)	Municipio	Cuenca
1	60031	Los Tololos	550639	1421423	160	El Sauce	Río Estero Real
2	60027	El Pilón	541893	1421719	130	El Sauce	Río Estero Real
3	60029	Laguneta	543695	1426637	160	El Sauce	Río Estero Real
4	60032	Los Loros	541879	1432164	170	El Sauce	Río Estero Real
5	69113	La Montaña	562567	1425141	680	Santa Rosa del Peñón	Río San Juan

En la figura 24, se presenta la distribución espacial de las estaciones pluviométricas seleccionadas, que son parte de la red de estaciones meteorológicas del INETER, donde ubican en el interior de la cuenca y una al este de la misma (estación La Montaña).

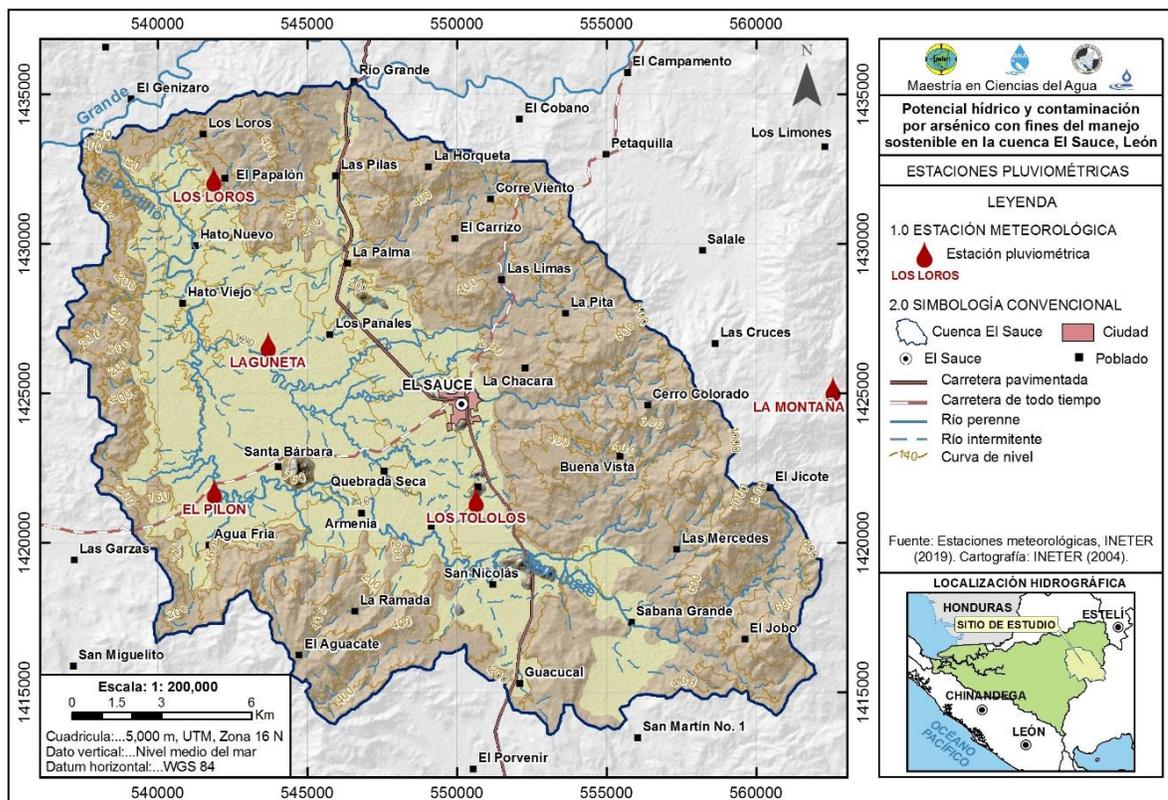


Figura 24. Mapa de ubicación de estaciones pluviométricas en la cuenca El Sauce

3.3.2.2 Temperatura

En la cuenca no se encuentra estación principal que permita el registro de la temperatura, por tanto, se consideró la estación meteorológica principal (HMP) más cercana al área de estudio, siendo la estación León, código 64043, de esta se evaluó el mismo periodo de la precipitación (2004 – 2018). Se tomó los datos de temperatura de esta estación debido a que esta contiene registros completos y recientes, aunque dista a 64 km y en dirección suroeste a la cuenca, es la más representativa para la cuenca de estudio.

3.3.2.3 Evapotranspiración

La evapotranspiración se calculó a través de la fórmula de Hargreaves simplificada, la que requiere registros de temperatura mínima, media y máxima, además de la radiación solar extraterrestre, en mm/día, (Hargreaves & Samani, 1985).

El registro de temperaturas fue tomado de la estación León con código 64043 para un periodo de 15 años (2004 - 2018).

La fórmula utilizada por el método de Hargreaves es la siguiente:

$$ET_0 = 0.0023 (t_{med} + 17.78) R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

Donde:

ET_0 = Evapotranspiración potencial diaria, en mm/día

t_{med} = Temperatura media diaria, °C

R_0 = Radiación solar extraterrestre, en mm/día (tabulada)

t_{max} = Temperatura diaria máxima, °C

t_{min} = Temperatura diaria mínima, °C

La evapotranspiración de referencia (ETP_0) fue corregida en función de la cobertura predominante en la cuenca, obteniendo un factor de corrección de 0.90, como coeficiente reductor de la evapotranspiración obtenido con base a los valores establecido en el Libro Blanco del Agua en España (MIMAM, 1998), para tierra de labor (cultivos anuales) y vegetación arbustiva.

3.3.3 Dinámica de ríos

Para la valoración de las dinámicas de las aguas superficiales se analizaron los caudales (Q) de ríos, se consideró la velocidad a la cual transitan los flujos de agua por una sección transversal del río. La velocidad de los flujos se calculó utilizando las ecuaciones de los molinetes (instrumentos) utilizados para tal fin. Los instrumentos utilizados y sus ecuaciones se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Ecuación de velocidad en m/s de molinetes utilizados

Molinete	Ecuación de velocidad (m/s)
Gurley Pigmeo modelo 625	$v = (0.2927 * n + 0.0095)$
Scientific Instruments Inc. modelo tipo AA	$v = (n * 2.2048 + 0.0178 * 0.0348)$

Donde v: velocidad del flujo de la corriente (m/s), n: número de revoluciones

A partir de la velocidad y sección de aforo, se determinó el caudal (Q), empleando la ley de Darcy. Con estas variables se evaluó la dinámica de los ríos en el tiempo, considerando registros de caudales en los meses de abril y octubre de los años 2013 y 2017, por otra parte, se analizó la variación de los caudales en periodo de estiaje, este correspondiente a enero de 2014.

La ley de Darcy, se contempla en la siguiente ecuación:

$$Q = v * A$$

Donde:

v: velocidad de la corriente (m/s)

A: área de la sección transversal (m²).

3.3.4 Infiltración del agua en los suelos

Se determinó la tasa de infiltración del suelo (k_s) a través de la realización de las pruebas de infiltración con el método de doble anillo, esta representa la variación de altura de la columna de agua en el anillo interno en un periodo de tiempo definido. Conocida la tasa de infiltración, se realizó corrección, considerando los efectos gravitacionales, de presión por la altura de la lámina de agua y capilaridad sobre la tasa de flujo infiltrada.

El valor de la velocidad de infiltración cuasi-constante (k_{fs}) se obtiene con la ecuación Reynolds & Elrick (1990):

$$k_{fs} = \frac{k_s}{\frac{H}{C_1 d + C_2 r} + \frac{1}{\alpha(C_1 d + C_2 r)} + 1}$$

Donde:

k_{fs} : tasa de infiltración cuasi-constante (mm/h)

k_s : tasa de infiltración básica (mm/h)

H: profundidad estable del agua contenida en el anillo (cm)

C1: 0.316π (constante adimensional)

C2: 0.184π (constante adimensional)

D: profundidad a la que fue insertado el anillo en el suelo (cm)

a: radio del anillo (cm)

α : longitud macroscópica efectiva (cm^{-1})

Para la valoración de la tasa de infiltración cuasi-constante por día, se consideró un tiempo de ochos horas lluvias, teniendo en cuenta el comportamiento pluviométrico de la cuenca.

3.3.5 Recarga de la cuenca

La recarga de la cuenca fue estimada como recarga natural de la cuenca y recarga por retorno, la primera producto de la infiltración de lluvia, y la segunda atribuida a perdidas en el sistema de la redes de abastecimiento de agua y producto del riego agrícola que se desarrolla en la cuenca.

3.3.5.1 Recarga por infiltración de lluvia

Para la estimar la recarga potencial del acuífero, producida por la infiltración profunda de las precipitaciones, se empleó el modelo analítico propuesto por Schosinsky (2007), que consiste en la realización de un balance hídrico de suelo; el modelo analítico fue aplicado en los distintos ensayos de infiltración realizados, en este se integran datos de precipitación, ETP y coeficiente de infiltración de los suelos; este último considera vegetación, profundidades de las raíces, pendiente y textura de suelo.

La valoración de la precipitación se realizó con base a cuatro estaciones ubicadas en el interior de la cuenca y una del entorno, esta última ubicada al este (Estación La Montaña). Los valores de evapotranspiración se tomaron de la estación León, siendo esta la estación principal más cercana al área de estudio. Tanto los datos de precipitación y ETP fueron evaluados para un período de 15 años, evaluando la serie de 2004 - 2018.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

En relación a la pluviosidad considerada para cada prueba de infiltración, se seleccionó la estación meteorológica, de mayor influencia a los sitios de pruebas de infiltración. Para las pruebas de infiltración ubicadas en el sector norte y noroeste de la cuenca, se consideró la precipitación promedio de la cuenca.

Debido a que no se realizaron análisis de las propiedades físicas de suelos como, capacidad de campo (CC), punto de marchites (PM) y densidad aparente del suelo (DS), todas asociadas a la textura de suelos, se consideró el valor promedio de los rangos establecidos por Israelsen & Hanzen (1979), presentado en tabla 12.

En cuanto a las profundidades de raíces (PR), las mayores longitudes (profundidades) se hallan en el acuífero poroso, con suelos de mayor profundidad; no obstante, no se consideró profundidades mayores a 400 mm, en coberturas de cultivos anuales y pastos, debido a que no alcanzan profundidades considerables.

Por otra parte, en zona de montañosa y de laderas, no se consideraron profundidades mayores a los 300 mm, porque los suelos superficiales, característicos de la meteorización de las rocas no son profundo, estos están cubiertos principalmente por vegetación arbustiva y tacotales en la cuenca.

Tabla 12. Propiedades físicas de los suelos y profundidad de las raíces

Textura de suelo	CC (%)	PM (%)	DS (g/cm ³)	PR (mm)
Franco	22	10	1.4	400
Franco limoso*	25	12	1.37	300 - 400
Franco arcilloso	27	13	1.33	300
Arcillo arenoso	31	15	1.3	300
Arcillo limoso*	34	16	1.28	300 - 400
Arcilloso	36	17	1.25	400

Fuente: Israelsen & Hansen (1979)

*Propiedades físicas de textura calculada a partir de valor de textura anterior y posterior

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Además, se consideró los componentes de coeficientes de infiltración por pendiente del terreno y cobertura vegetal propuestos por Schosinsky & Losilla (2000), presentando su valor de acuerdo al medio acuífero donde se ubican los ensayos, detallado en tabla 13.

Tabla 13. Componentes del coeficiente de infiltración

Acuífero	Por pendiente		Por vegetación	
	Tipo	Kp (0.01%)	Tipo	Kv
Poroso	Plano - ligeramente inclinado	0.15 - 0.30	Cultivos anuales, Cobertura con pastizal, Vegetación arbustiva,	0.15 - 0.21
Fracturado	Inclinado - escarpado	0.06 - 0.10	Vegetación arbustiva, Cobertura con pastizal, Tacotal	0.18 - 0.21

Fuente: Kp y Kv tomado de Schosinsky & Losilla (2000)

Con los resultados del balance hídrico de suelos, se obtuvo la recarga del acuífero, a partir de la zonificación de área de recarga, para la delimitación de estas se consideró criterios edafológicos y geológicos.

3.3.5.2 Recarga por retorno

La recarga por retorno se calculó teniendo en cuenta las pérdidas en el sistema de abastecimiento de agua potable y por exceso de riego, para la primera se consideró el 20% (dispuesto en la “*Norma de Diseño de Sistemas de Abastecimiento y Potabilización del Agua*”) del volumen de aprovechado para consumo humano extraído por bombeo, mientras que, para el uso agrícola se utilizó el 30% del volumen de agua extraída, dicho porcentaje fue determinado a partir de las eficiencias de los sistemas de riego de mayor uso en la cuenca (aspersión y gravedad), basado en Pereira et al, (2010).

3.3.6 Hidrodinámica de las aguas subterráneas

La valoración del sistema hidrodinámico se analizó a través del registros de datos y gráficos de la fluctuación de niveles del agua subterránea, y la representación espacial de la profundidad del agua y de isofreáticas (curvas de igual nivel freático) en el acuífero poroso; donde existen pocos datos solo se muestra el valor puntual; como producto final.

Con el registro de niveles de agua obtenido en 2013 y 2017, se determinó la evolución del acuífero en el tiempo, y con el registro de los niveles estáticos de agua de 2017, de este se obtuvo la media interanual, determinado a partir de la dos mediciones (abril y octubre de 2017), se realizó el mapa de profundidad de agua subterránea anual, analizado a través del procesamiento de los datos con el software surfer 10; así mismo se obtuvo la representación espacial de las isofreáticas media anual para el 2017, el cual fue objeto de análisis e interpretación.

3.3.7 Características hidráulicas

Para caracterizar la distribución de las propiedades hidráulicas del acuífero poroso, se utilizaron tres pruebas de bombeo proporcionada por ENACAL, las que datan de los años 2008 y 2016, para el análisis de esta, se empleó el software Aqtsolv, el cual posee diversos métodos de solución, utilizando el método de Neuman, a través de este se determinó las transmisividades.

Asimismo, se consideró los resultados de cuatros pruebas de bombeo presentado en el estudio de INETER (2008), elaborándose un mapa de temático a partir de la información generada en el estudio y con información de antecedente.

Además, de la estimación del parámetro transmisividad, se determinó la conductividad hidráulica y capacidad específica, con base a las tres pruebas de bombeo, proporcionada por ENACAL, y también se consideró los resultados de los parámetros antes descritos de las cuatros pruebas de bombeo presentado en el estudio de INETER (2008).

La permeabilidad o conductividad hidráulica fue calculada a partir de la siguiente formula:

$$K = T / b$$

Donde:

K: Permeabilidad o conductividad hidráulica (m/d)

T: Transmisividad (m²/d)

b: Espesor de acuífero captado (m)

Mientras para la estimación de la capacidad específica se empleó la ecuación siguiente:

$$q = Q / s$$

Donde:

q: Capacidad específica (m³/h/m)

Q: Caudal de agua bombeado (m³/h)

s: Descenso medido en el pozo o abatimiento (m)

3.3.8 Esgurrimiento subterráneo

Se determinó teniendo en cuenta las características hidrodinámicas e hidráulicas del acuífero. A partir de la hidrodinámica del agua subterránea evaluada para el

2017, se obtuvo gradiente hidráulico, determinado para la sección de descarga, mientras las características hidráulicas, corresponden a datos de transmisividad; a partir de los parámetros antes descrito, se calculó la descarga subterránea en la zona de descarga de la cuenca, aplicando la ecuación de Darcy.

La ley de Darcy, se contempla en la siguiente ecuación:

$$Q = T * i * L$$

Dónde,

Q: escurrimiento subterráneo (m³/d)

T: transmisividad (m²/d)

i: gradiente hidráulico (adimensional)

L: Ancho de la sección de drenaje del agua subterránea (m)

3.3.9 Uso y consumo

Para conocer el uso y consumo del agua subterránea de la cuenca El Sauce, se recopiló información de campo por medio de un inventario de fuentes de agua realizado en 2013 y actualizado al 2018, permitiendo cuantificar las extracciones de agua subterránea de uso potable, por otra parte, para obtener los volúmenes de aprovechamientos de los usos doméstico, riego y ganadería se empleó datos estadísticos de censo, asociándolos a dotaciones y lámina de agua, según su uso.

3.3.9.1 Consumo humano de agua

En la valoración de los volúmenes de agua aprovechados en la cuenca, se consideró el consumo de agua de la población urbana y rural, esta última encontrándose en caseríos dispersos, así mismo se cuantificó el consumo de agua demandado por la producción de ganado bovino y el destinado a la actividad agrícola.

El consumo de agua de la población urbana se obtuvo a partir del régimen de bombeo de los pozos de ENACAL, considerando horas de bombeo al día y caudal de operación; con el mismo criterio se cuantificó, el volumen de agua bombeado en pozos comunales, establecidos como CAPS, que cuentan con una red de agua potable, abasteciendo comunidades rurales concentradas.

Por otra parte, para las comunidades rurales que no cuentan con una red de abastecimiento de agua potable, los volúmenes de agua aprovechados se determinaron con lo dispuesto en la NTON 09 003-99 "*Norma técnicas para el diseño de abastecimiento y potabilización del agua*", (INAA, 2001), determinando el número de habitantes por comunidades asentadas en la cuenca y empleando dotación de 75 L/hab./d, asignadas a poblaciones entre 1 – 5,000 habitantes, correspondiente al consumo para las ciudades del resto del país; dando como resultado una demanda diaria por comunidad, proyectada anualmente.

3.3.9.2 Uso pecuario

En cuanto a la valoración del consumo de agua destinado a la actividad pecuaria, se determinó a partir de la relación directa del número de cabezas de ganado bovino por la dotación asignada por cabeza; para ello, se identificaron las comunidades productoras de ganado bovino que intervienen la cuenca, obteniendo el número de cabezas de ganado por comunidad, con base a los datos del censo pecuario realizado por la Alcaldía El Sauce en 2007, proyectándolo al año 2018 y aplicando dotación de 40 L/cabeza de ganado/d, descrita por UNESCO (2006). Obteniendo la demanda diaria de ganado por zona.

3.3.9.3 Uso agrícola

La estimación de los volúmenes de agua aprovechados en la irrigación de cultivos, se obtuvo a partir de las áreas de riego, las que con base al IV Censo Nacional Agropecuarios realizado por INIDE & MAGFOR (2013), corresponden a 77.82 ha, ha, e irrigadas en unos casos por gravedad, o por aspersión o bien goteo.

Así mismo, se consideró una lámina de riego inferior al del cultivo permanente de mayor producción en el municipio (musáceas), proponiendo una lámina de 6 mm, 20 días de riego al mes y 10 meses del año en que se realiza riego.

3.3.10 Balance hidrogeológico

Del resultado de los parámetros pluviométricos, hidrológicos e hidrogeológicos se realizó el balance hidrogeológico de la cuenca, integrando variables superficiales de salidas del sistema, mientras para subterráneas variables de entrada y salida del sistema, con el fin de obtener la variación de volumen en la cuenca de estudio.

La ecuación de integración es la siguiente:

$$\Delta V = (\text{Entradas}) - (\text{Salidas})$$
$$\Delta V = (R + R_{AS} + R_r) - (E_{\text{Pozos}} + A_{Mn} + Q_{\text{Subt.}} + F_{\text{Base}})$$

Donde:

ΔV : Variación del Almacenamiento

Variables de entradas

R: Recarga natural por infiltración de las lluvias

R_{AS} : Recarga por agua superficial

R_r : Recarga por retornos de agua

Variables de salidas

E_{Pozos} : Extracciones por pozos

$A_{\text{Mn.}}$: Aprovechamiento a través de manantiales

$Q_{\text{Subt.}}$: Escurrimiento subterráneo de salida

Q_{Base} : Caudal base de salida

Las variables son volúmenes de agua y expresadas en Mm^3/a .

3.3.11 Calidad hidrogeoquímica

Se analizó en dos aspectos: calidad de los parámetros físicos químicos de campos y contaminación natural por arsénico.

La medición de parámetros fisicoquímicos de campo incluyo: temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (TDS), oxígeno disuelto (OD) y potencial redox (Eh). El registro de estos, se realizó en época seca y lluviosa del año 2013, a excepción del redox, medido únicamente en el periodo lluvioso.

En cuanto a la valoración de los parámetros físico-químicos *in situ*, registrado tanto en periodo seco y lluvioso, permitió evaluar el comportamiento estacional de estos. Los cuatro primeros parámetros citados en párrafo anterior, fueron comparados con la norma de calidad de agua para consumo humano (CAPRE).

La calidad del agua, se analizó únicamente para el metal pesado arsénico, se comparó con la Norma CAPRE (1994), para valorar si son aptas para consumo humano. Además de representar la distribución espacial de la contaminación por arsénico, a fin de identificar zonas afectadas por este contaminante.

3.4 Análisis e interpretación de resultados

Una vez obtenidos los resultados del analito analizados y procesados, la información se representó a través de mapas y gráficos para su interpretación y conocimiento del área de estudio. La elaboración de los mapas temáticos se efectuó a través de ArcGis 10.5.

3.5 Elaboración del documento final

Este se redactó atendiendo los requerimientos de la guía correspondiente a la elaboración de documento PG V (Proyecto de Graduación V), establecidos por el programa de la Maestría en Ciencias del Agua del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos (CIRA/UNAN-Managua).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Aspectos socioeconómicos

Estos fueron dirigidos a identificar la población inserta en la cuenca El Sauce, así como las actividades económicas que demandan mayor uso de los recursos hídricos.

4.1.1 Población

Con base a proyecciones de población realizada al 2018 los municipios de El Sauce y Santa Rosa del Peñón presentan 32,671 y 10,167 habitantes, respectivamente; en la cuenca reside una población de 24,307 habitantes que pertenecen al primer municipio y 616 Santa Rosa del Peñón. En el gráfico 1, se ilustra la población total de los municipios que integran a la cuenca y el número de habitantes ubicados en la cuenca.

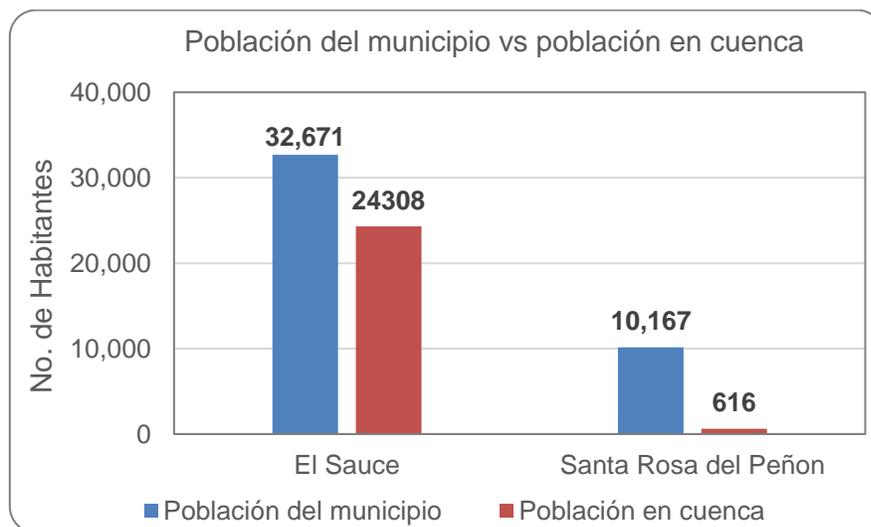


Gráfico 1. Población del municipio vs población en cuenca

La población del municipio de El Sauce inserta en la cuenca es de 24,924 habitantes, compuesta de 7,851 habitantes la población urbana y 16,458 habitantes la rural, representado el 31.5 y 66% de la población inserta en cuenca; en cuanto a la población de Santa Rosa del Peñón, con tan solo 616 habitantes correspondiente a población rural, representa el 2.5%. En el gráfico 2 se presenta la población total en la cuenca y la distribución de la población urbana y rural de acuerdo al municipio.

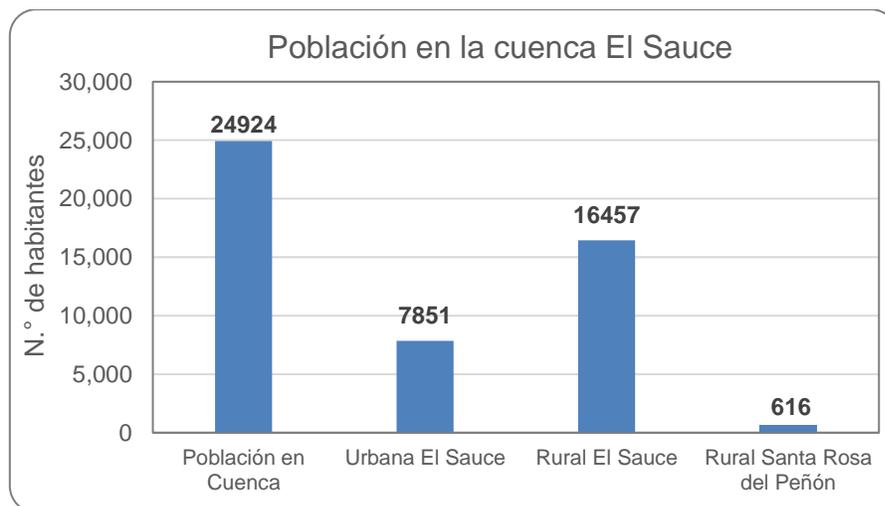


Gráfico 2. Población en la cuenca El Sauce

4.1.1.1 Subdivisión comarcal del municipio El Sauce en la cuenca

Al municipio de El Sauce la conforman 16 comarcas y la ciudad del mismo nombre del municipio, está, ubicada en la parte central de la cuenca; del total de comarcas, 5 se ubican completamente en el interior de la cuenca, 6 parcialmente y 4 no son parte del sistema de la cuenca.

Las comarcas se desagregan en caseríos o comunidades, en la tabla 14 se presentan las que de alguna manera tienen influencia en la cuenca; por otra parte, se estableció la cobertura de la comarca en la cuenca considerando el número de

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

caserío en cuenca con el número total que posee la comarca. En el caso de la comarca Santa Lucía, está compuesto de 11 caseríos, sin embargo, solo uno se ubica en el interior de la cuenca, (tabla 14).

La distribución de caseríos por comarcas se obtuvo del censo de población municipal de 2017, proporcionado por la alcaldía de El Sauce, (tabla 14).

Tabla 14. Caseríos ubicados en el interior de la cuenca por división comarcal, municipio de El Sauce

No	Comarca	Nombre de caserío en cuenca	Caserío en: Cuenca/Comarca
1	Sabana Grande	Sabana Grande #1*, Sabana Grande #2, Palmar Sur, El Jiquelite, La Ceiba	5/7
2	Las Mercedes	Piedra de Agua, Mercedes Centro*, La Estancia, El Borbollón, Cooperativa Ismael Castillo, El Almendro, Los Guásimos	7/7
3	Ocotal	Cerro Colorado, Buena Vista, El Guayabo, Las Minitas, La Flor	5/10
4	El Salitre	Correvientos, Las Limas*, El Carrizo, La Montañita, Pita/Potrero, La Jícara, El Salitre	7/8
5	La Palma	La Palma*, Santa Rita, El Chaparral, La Puerta, Las Cañas, San Cayetano, Los Limones	7/7
6	Río Grande	La Horqueta, Los Jobitos, Río Grande*, La Sabana, El Behuco, Puente Ocho, Las Pilas, Chagüite Grande	8/10
7	Los Loros	Los Encuentros, Los Loros*, El Papalón, Hato Nuevo, Bervería	5/5
8	Santa Lucía	El Guacucal	1/11
9	Los Tololos	San José, La Suiza, San Ramón, Tololos Centro*, Esquipulas, El Tejar, Las Ramadas, San Nicolás	8/8
10	Santa Bárbara	Armenia, La Carreta, Santa Bárbara*, Quebrada Seca	4/4
11	Agua Fría / El Pilón	Cenicera Oeste, San Agustín, Agua Fría*, El Pilón, Tres Puertas, Montoya	6/9
12	Los Panales	El Pavón, Panales, Hato Viejo N.º 1, La Laguneta, La Esperanza*, El Sayulero, Los Reyes, Los Calderones, Cooperativa 19 de Julio, Los Rochas, Monte Grande	10/11

*Cabecera comarcal

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

De acuerdo a la tabla 14, en el área de estudio se compone en parte de 12 comarcas, de las cuales 3 se ubican en áreas del valle, siendo estas Los Tololos, Santa Bárbara y Los Panales, por otra parte, se ubican 3 en zonas adyacentes al medio fracturado, entre esta se encuentran Sabana Grande, Santa Lucía y Agua Fría / El Pílon y cuatro ubicadas en la parte alta; en cambio en zonas fracturadas y de montaña se identifican Las Mercedes, Ocotal, El Salitre, Río Grande y Los Loros.

En el gráfico 3 se presenta la distribución de la población de las comarcas ubicadas en la cuenca El Sauce.

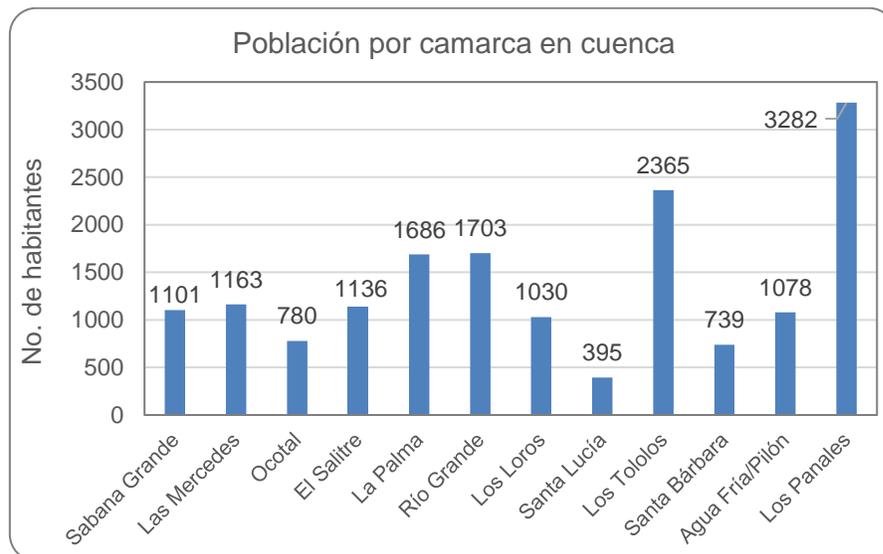


Gráfico 3. Población comarcal en cuenca El Sauce del municipio El Sauce

Las comarcas con mayor población en la cuenca El Sauce, corresponden a Los Panales, seguido de Los Tololos, Río Grande y La Palma, donde la primera y la segunda posee una población de 3,282 y 2,365 habitantes, respectivamente.

Por otra parte, las comunidades bajo la jurisdicción del municipio de Santa Rosa del Peñón ubicada en la cuenca son tres: El Jicote, Las Cañas y Buena Vista, en

conjunto poseen una población de 616 habitantes, donde la primera presenta la mayor población; estas ubicadas en zona adyacente a la naciente del río principal de la cuenca.

4.1.2 Actividad económica

La base del desarrollo económico del municipio de El Sauce se sustenta fundamentalmente en las actividades agropecuarias, siendo las principales, la agricultura y la ganadería mayor. En menor escala aparece el comercio, las pequeñas y medianas empresas artesanales.

De esta manera, la agricultura y la ganadería mayor en la actualidad juegan un papel importante como fuentes generadoras de ingresos, empleo y bienestar en el municipio.

4.1.2.1 Actividad pecuaria

Con base a datos del censo realizado por la alcaldía El Sauce y proyectado al 2018, se obtuvo el número total de ganado bovino, determinando un total 16,345 cabezas de ganado. Las comunidades con mayor producción de ganado son Los Panales y Los Tololos con 3,432 y 2,111 cabezas de ganado, respectivamente, estas ubicadas en la parte central y sureste del valle, (gráfico 4).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

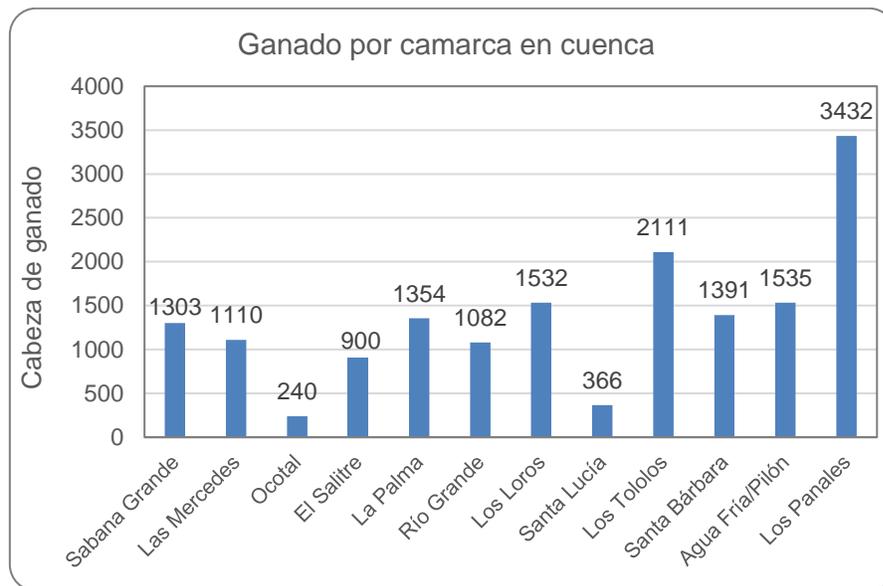


Gráfico 4. Ganado bovino en cuenca El Sauce

4.1.2.2 Actividad agrícola

Entre los rubros agrícolas más generalizados y extensivos actualmente a nivel municipal, sobresalen los granos básicos (maíz, sorgo y frijol) y menor escala, los rubros de ajonjolí, hortalizas y arroz.

En las zonas altas de la cuenca subsiste un esquema de policultivo restringido a granos básicos, mientras, en la zona del valle el esquema de policultivo es un poco más amplio, extendiéndose desde granos básicos, ajonjolí, arroz y musáceas, siendo este último, el cultivo permanente de mayor producción en la cuenca, según datos de INIDE-MAGFOR 2013.

De acuerdo al IV Censo Nacional Agropecuario, realizado en 2013, el municipio El Sauce tiene 67,672.74 manzanas dedicadas a la explotación agropecuaria, de estas solamente se irrigan 123.51 manzanas, irrigando 46.52 por gravedad, 15.24 por goteo, 49 por aspersión y 12.75 manzanas de forma manual.

4.2 Climatología

Comprende la valoración de las variables precipitación, temperatura y evapotranspiración, donde las dos últimas variables fueron determinadas a partir de registros externos, pero consideradas representativas para la cuenca en estudio.

4.2.1 Precipitación

A efectos de considerar la correlación de los datos de precipitación CHIRPS con los datos de las estaciones consideradas se realizó análisis de consistencia mediante el método de doble masa, evaluando el periodo 2001-2014.

Para el análisis de dobles masa se comparó la lluvia mensual acumulada de la estación con datos medidos (acumulados), con la precipitación mensual acumulada obtenida de CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*).

Una línea recta representa una buena relación entre sí. Como se observa en los gráficos 5 y 6, el índice de correlación R^2 es de 0.9929 para la estación Los Tololos vs datos CHIRPS y 0.9972 para la estación Los Loros vs datos CHIRPS; además, puede observarse que la línea sigue una tendencia lineal para ambos gráficos.

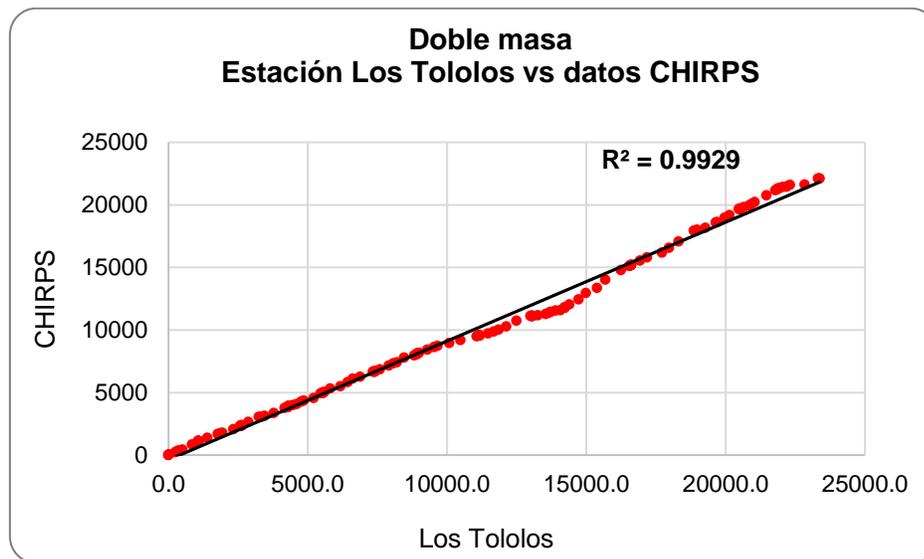


Gráfico 5. Curva de doble masa: precipitación media acumulada CHIRPS vs estación Los Tololos, periodo 2001 – 2014

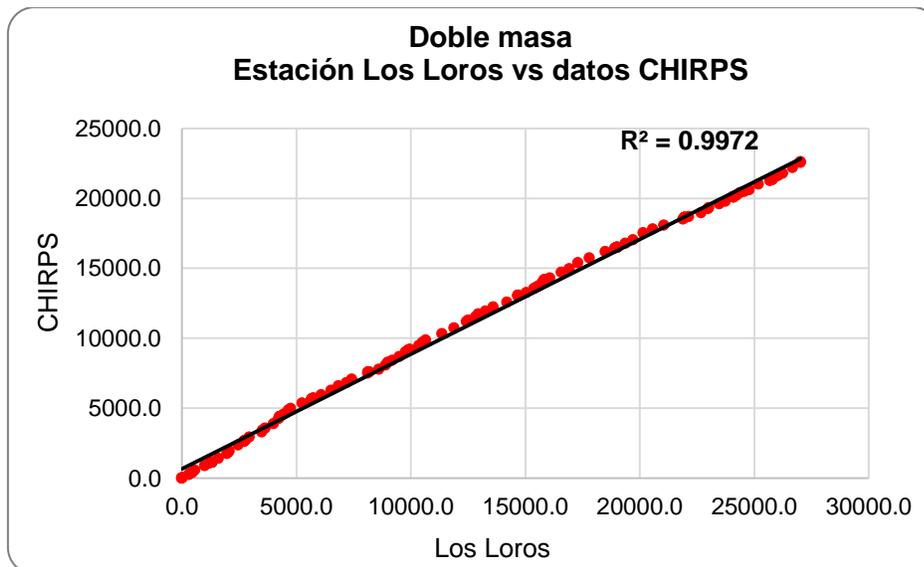


Gráfico 6. Curva de doble masa: precipitación media acumulada CHIRPS vs estación Los Loros, periodo 2001 – 2014

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Como parte del análisis también se consideró la distribución de los datos en el tiempo, donde se puede apreciar en los gráficos 7 y 8 que los datos CHIRPS con los medidos por las estaciones tienen la misma tendencia.

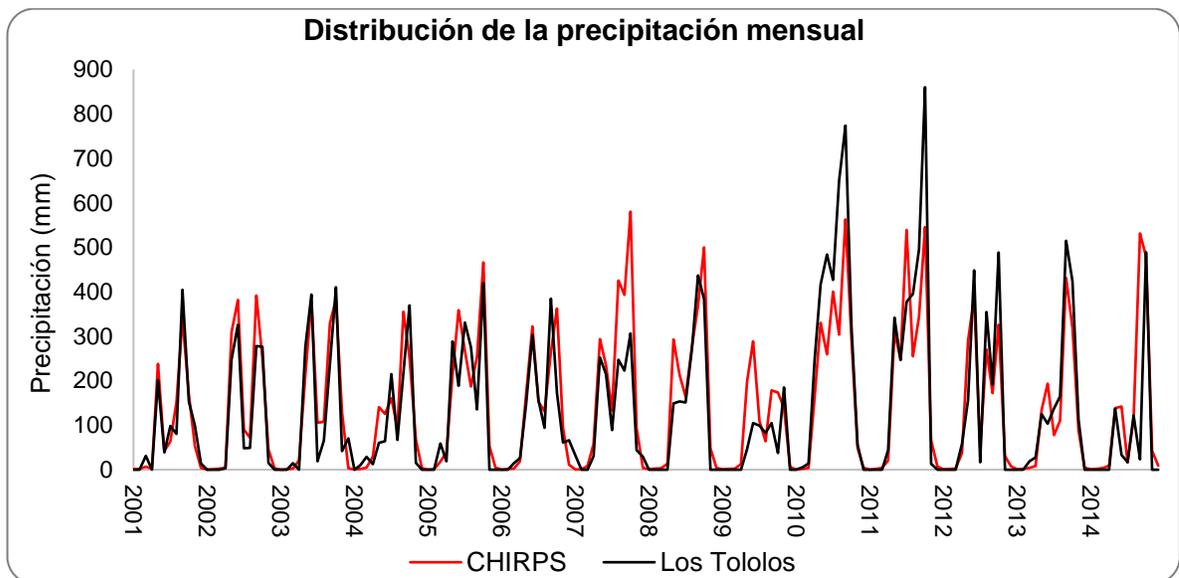


Gráfico 7. Precipitación anual de datos CHIRPS y estación Los Tololos, periodo 2001 – 2014

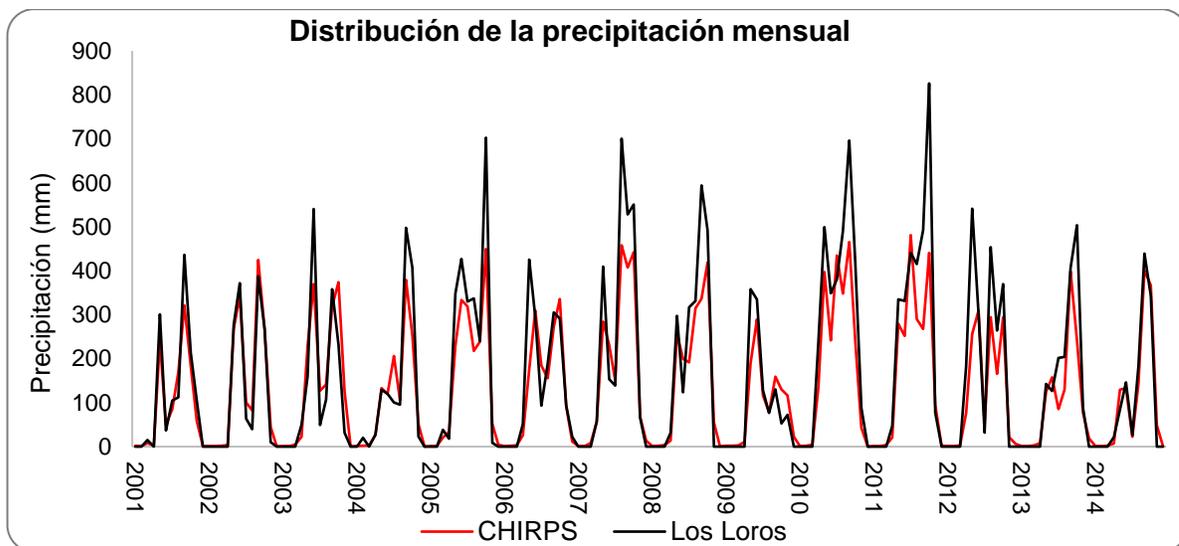


Gráfico 8. Precipitación anual de datos CHIRPS y estación Los Loros, periodo 2001 - 2014

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Cabe destacar, que de igual manera se valoró la correlación con la estación principal León (código 64043) con las estaciones consideradas, sin embargo, los coeficientes obtenidos eran menores a los obtenidos con los datos CHIRPS.

En tabla 15, se presenta la precipitación media anual de las cinco estaciones consideradas, de las cuales cuatro se ubican en el interior de la cuenca y una fuera de la misma (estación La Montaña, ubicada al este). De manera general la precipitación promedio anual en la cuenca alcanzan los 1,804.3 mm.

Tabla 15. Precipitación media mensual, periodo 2004 -2018

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Los Tololos	2.4	1.5	10.3	42.1	208.6	218.1	153.7	213.1	301.3	401.6	65.0	9.8	1,627.6
Laguneta	0.4	0.5	4.6	38.5	295.3	293.5	196.0	282.1	444.1	505.8	64.8	3.7	2,129.3
El Pilón	0.2	2.8	10.7	49.1	240.6	238.7	147.4	201.4	348.1	411.9	65.4	4.8	1,721.1
Los Loros	0.4	1.8	3.6	56.2	297.9	236.0	165.8	261.2	367.3	424.9	59.9	7.1	1,882.1
La Montaña	1.6	0.5	1.5	39.4	179.0	231.9	143.9	229.5	312.2	430.8	71.7	19.4	1,661.3
Promedio	1.0	1.4	6.2	45.1	244.3	243.6	161.4	237.5	354.6	435.0	65.4	9.0	1,804.3

De acuerdo a los datos presentados en el gráfico 9, en el área de estudio se presenta un período lluvioso muy definido en los meses de mayo a octubre y un período seco de noviembre a abril.

Los valores máximos promedio de precipitación mensual en la cuenca, se presentan en el mes de septiembre y octubre, con 354.6 y 435.0 mm, respectivamente. A partir de noviembre inicia el periodo seco, donde la precipitación disminuye alcanzado los 65.4 mm, posteriormente la ocurrencia de precipitaciones disminuye, pasando a ser casi nula en los meses de enero y febrero, (gráfico 9).

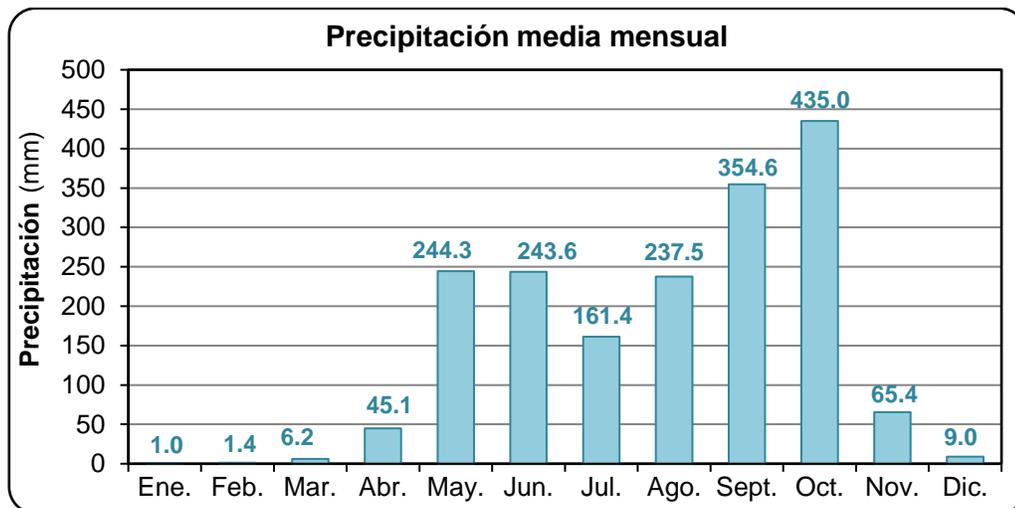


Gráfico 9. Comportamiento de la precipitación media mensual, periodo 2004-2018

En el gráfico 10 se presenta el valor de la precipitación promedio anual de la cuenca de 1804.30 mm, con los valores anuales de la serie evaluada, donde los años de mayor pluviosidad corresponden al 2007, 2010 y 2011, con 2,609.9; 3,402.8 y 2652.3 mm, respectivamente; mientras los de menor pluviosidad fueron los años 2009, 2014 y 2015, con 1071.2; 1020.90 y 962.5 mm, respectivamente.

De acuerdo al Centro de Predicción Climática (CPC) los tres años de mayor pluviosidad son considerados años Niñas, mientras el 2009 y 2015 años Niño y el 2014 como un año Neutro.

Del 2010 al 2015, se presentó reducción en las precipitaciones y a partir de 2015 presentan un ligero aumento hasta el 2017, para posteriormente descender en el 2018.

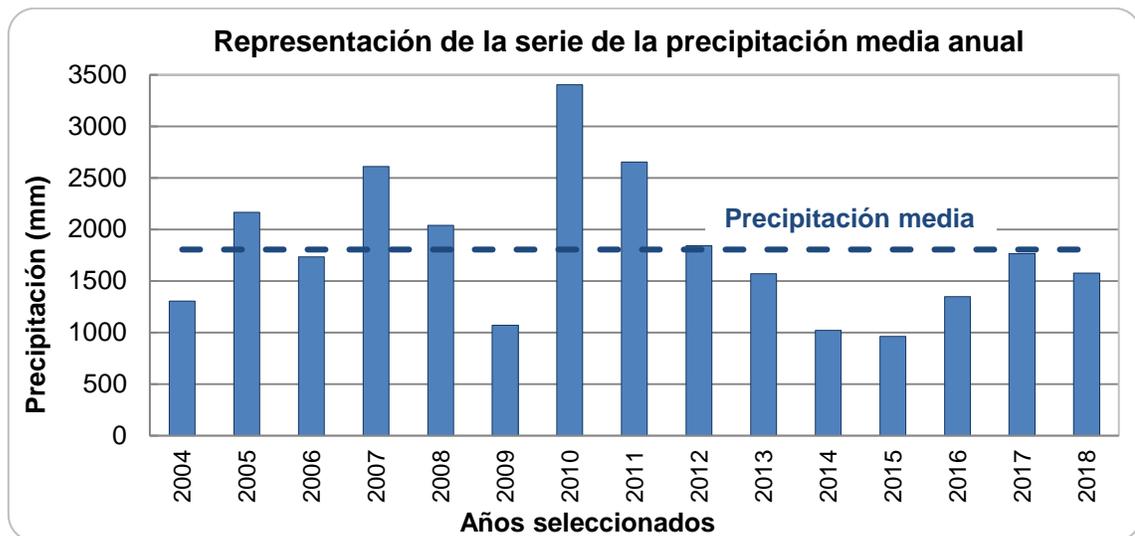


Gráfico 10. Comportamiento de la precipitación media anual, periodo 2004 – 2018

La distribución de la precipitación de la cuenca se representó a partir del método de las isoyetas; esta tiene un comportamiento orográfico desde el este y sureste de la cuenca debido al efecto del sotavento, presentándose las menores precipitaciones en el sureste de la cuenca con acumulados entre los 1600 y 1700 mm, y aumentando en las zonas intermedia del valle con más de 2,000 mm y en la zona de descarga inferiores a los 1,900 mm anuales, (figura 25).

En la parte media a baja de la cuenca se presentan las mayores precipitaciones, registrada a partir de la estación Laguneta, con un promedio anual de 2,129.3 mm, la ocurrencia de esta, podría deberse a la influencia de la zona de barlovento creado por los cerros Chagüite Grande y cerro Los Lirios que se ubica al norte de la zona de mayor pluviosidad.

La diferencia de precipitaciones entre la zona sureste y este corresponde también al contexto meteorológico regional, de esta manera la estación Los Tololos y La Montaña se localizan más cerca de la franja conocida como el “Corredor Seco de Nicaragua”, lo que afecta a sus precipitaciones; mientras la estación Laguneta se

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

ubica en una zona amplia del valle, libre de barreras montañosas que impiden el paso de los vientos que proceden del este.

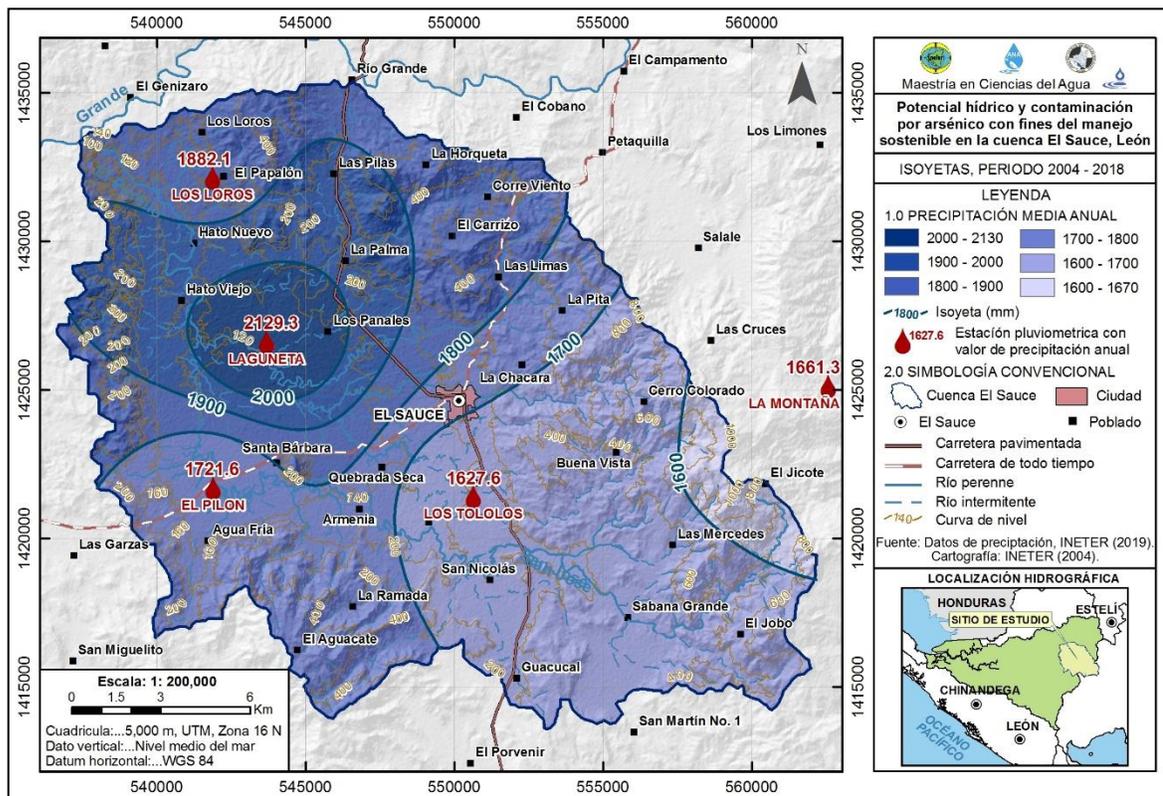


Figura 25. Mapa de distribución de la precipitación media anual, periodo 2004 -2018

4.2.2 Temperatura

Según la estación León, que dista a 64 km y en dirección suroeste a la cuenca, pero con temperatura media representativa para la cuenca de estudio, el promedio anual de la temperatura media es de 27.6° C. Las máximas temperaturas se presentan en los meses de marzo y abril con valores entre 29.0 a 29.5° C, que coincide con el último mes del periodo seco y la entrada del periodo lluvioso, mientras la temperatura media mínima se presenta en los meses de octubre y noviembre.

Asimismo, la temperatura media aumenta gradualmente a partir del mes enero hasta llegar a su punto máximo en abril, (gráfico 11, anexo 1.7).

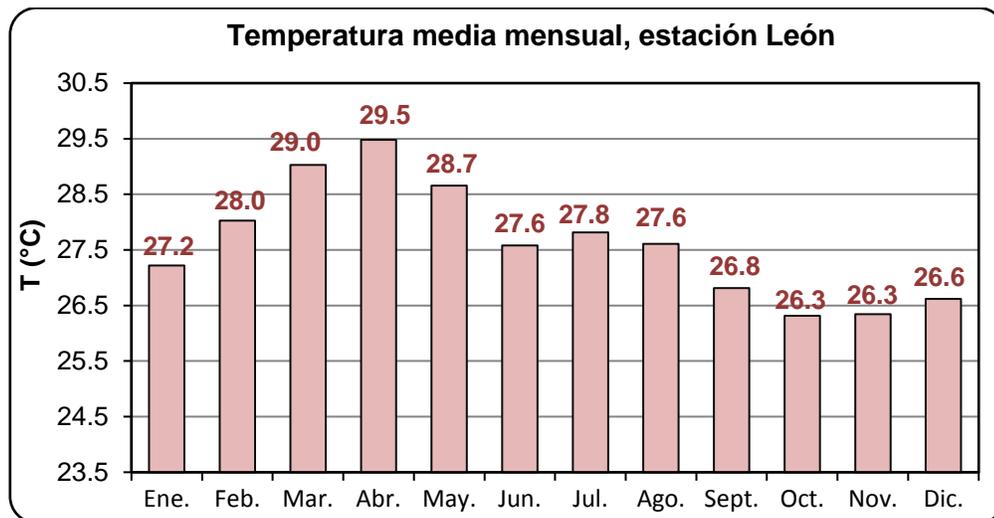


Gráfico 11. Comportamiento de la temperatura media mensual, periodo 2004 - 2018

4.2.3 Evapotranspiración

El valor de evapotranspiración potencial de referencia (ETP_0) anual obtenido para la cuenca fue de 1,830.10 mm, no obstante, debido a la cobertura de la cuenca, se realizó la corrección de esta variable, aplicando un factor de corrección de 0.90, como coeficiente reductor de la evapotranspiración (MIMAM, 1998), determinando un valor de evapotranspiración potencial anual corregida (ETP_c) de 1,647.1 mm, (anexo 1.9).

El comportamiento de la evapotranspiración sigue una tendencia de aumento de diciembre a abril, ocurriendo su máximo en marzo con un valor de 161.1 mm, disminuye hasta junio a 133.1 mm, aumenta ligeramente en julio y agosto debido al establecimiento de la canícula, posteriormente disminuye gradualmente hasta noviembre con 115.0 mm, donde se registra el valor más bajo del año (gráfico 12).

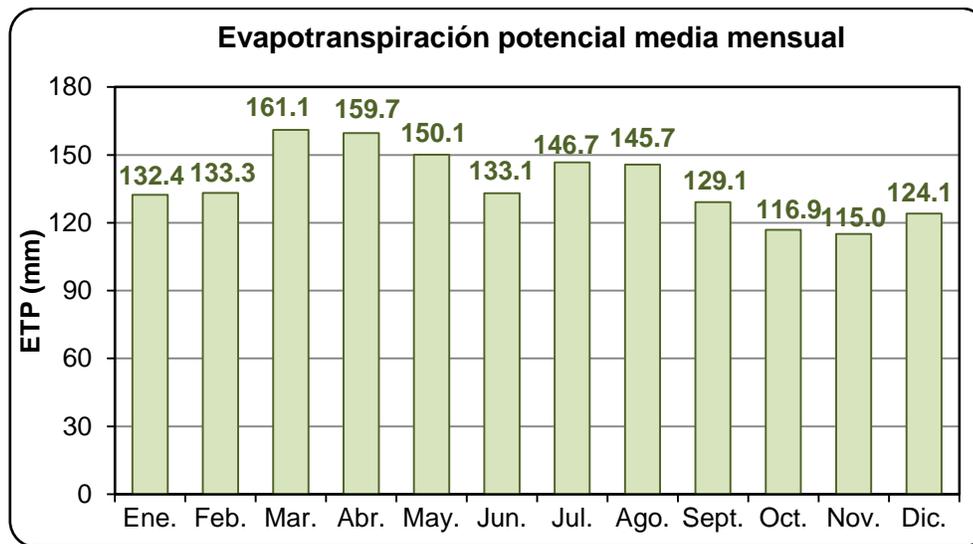


Gráfico 12. Comportamiento de la evapotranspiración potencial media mensual corregida, periodo 2004–2018

4.3 Hidrología

Comprende la descripción de los parámetros morfométricos de la cuenca y la dinámica tanto del río principal, como las de dos tributarios principales.

4.3.1 Morfometría de la cuenca

Con base a la metodología Pfafstetter, la cuenca se encuentra delimitada a nivel 7. Posee una superficie de 367.07 km² y un perímetro de 99.50 km, el curso principal es el río El Portillo que tiene su nacimiento en las laderas del Cerro El Jicote a una elevación de 1,125 msnm. El río principal en la parte media y baja de la cuenca es denominado Río El Portillo, mientras en la parte alta es nombrado río San José.

En su recorrido va modificando la dirección del curso, en dirección noroeste alcanza el mayor recorrido, en las inmediaciones de su recorrido toma un rumbo al norte y finalmente termina su curso en dirección noroeste, descargando sus aguas al Río

Grande, que posteriormente drena sus aguas al río Villanueva, (*Mapas topográficos*, INETER, 2006).

El drenaje se caracteriza por estar compuesto por ríos de régimen permanente e intermitentes de cortos recorridos y en algunos casos con un comportamiento estacional, es decir tienen escorrentías una vez que ocurre el evento de precipitación, y al finalizar el evento desaparece consigo mismo el caudal circulante.

La red de drenaje tiene en común un patrón de drenaje dendrítico, esto significa que los cursos de ríos circulan en todas las direcciones siguiendo las características del relieve.

Del proceso de cálculos de los parámetros morfométricos, se obtuvo que la densidad de drenaje es de 1.11 km/km², clasificándose como una cuenca medianamente bien drenada, es decir que concentra volúmenes de escurrimiento, lo que producen descensos de las corrientes torrenciales, esto debido a la litología del sustrato y la poca cobertura vegetal que existe en la zona.

Para el cálculo del tiempo de concentración se realizó mediante el método Basso, ecuación adaptado para Nicaragua y sugerida para nuestro país (Basso, 1977), se obtuvo un tiempo de concentración de 3.86 horas (231.80 minutos) indicando que la respuesta será media a lenta a determinada precipitación.

El tiempo de concentración en una cuenca es el tiempo transcurrido desde el final de la lluvia neta hasta el final de la escorrentía superficial. También se define como el tiempo que tarda la última gota de lluvia en llegar desde la parte más elevada de la cuenca hasta el punto de desagüe.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Esto se relaciona a su coeficiente de compacidad o de Gravelius de 1.40, indicando que es una cuenca con posibilidades de concentrar grandes volúmenes de agua, teniendo forma oval alargada.

La determinación de los parámetros físicos de importancia como los son, la longitud total de ríos (Li) en kilómetros de todos los cauces presentes y los ríos de primer orden.

De estos dos se generan la densidad de drenaje (Dd) que es de 1.11 km/km² y el coeficiente de torrencialidad (Ct) igual a 0.35 ríos/km². La densidad de drenaje cuantifica, en promedio, la longitud de cauces que existen para drenar un kilómetro cuadrado. En cambio, el coeficiente de torrencialidad cuantifica los ríos de primer orden presente en cada kilómetro cuadrado.

Topográficamente el relieve predominante de esta cuenca se caracteriza por estar ubicados en una región con grandes elevaciones y un relieve montañoso. De acuerdo a la clasificación del sistema montañoso, se afirma que la elevación media de la cuenca del río El Portillo, cuyo valor es de 285.83 msnm pertenece a las elevaciones bajas, teniendo como consecuencia que la cuenca esté regida predominantemente por los sistemas meteorológicos propios de esta categoría.

Las máximas elevaciones se encuentran en cerro El Jicote 1,118 msnm, fila La Joyita 1,041 msnm, fila El Coyol con 858 msnm y cerro Portillo de Sálale con 867 msnm entre las elevaciones más predominantes en la subcuenca.

Continuando con las elevaciones sobre el nivel medio del mar, pero con respecto a la longitud del río El Portillo que es de 59.25 km, se tiene que las elevaciones máxima y mínima para dicha longitud, son de 1,113 y 99 msnm, respectivamente.

En referencia a los polígonos de altitud se muestra en el gráfico 13 que el 82.52 % del área total de la cuenca se encuentra entre las cotas 130 a 400 msnm, lo que confirma el predominio de un terreno de planicie y pendientes suave en esta zona del territorio.

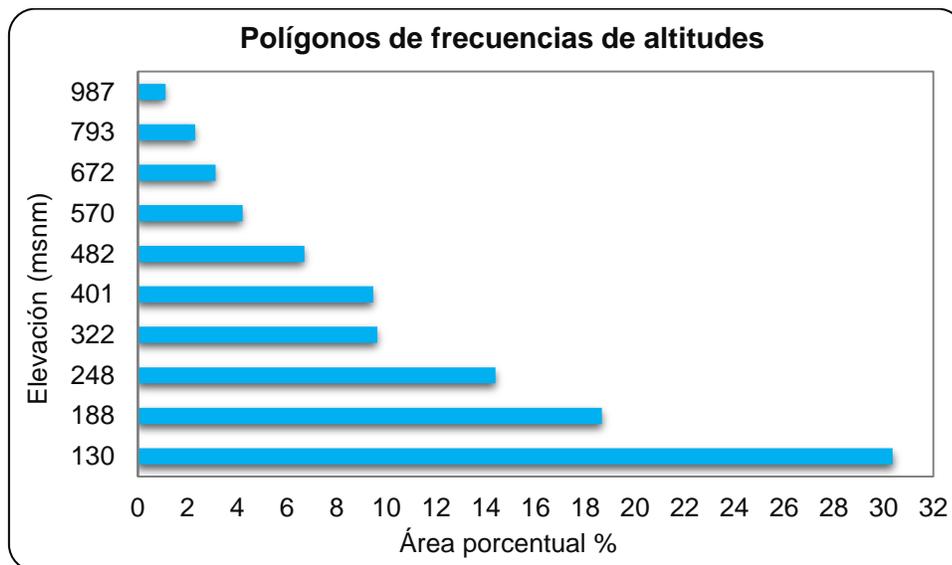


Gráfico 13. Polígonos de frecuencia de altitudes de la cuenca El Sauce

En gráfico 14 se muestra la curva hipsométrica la cual es una representación de la variación altitudinal de una cuenca y se obtiene a partir de un plano topográfico tomándose los valores en porcentajes del área que están por debajo de una determinada altura, que inicialmente serán la del punto más bajo de la cuenca e irá aumentando de acuerdo a los valores de las cotas de la curva de nivel que encierra las franjas de terreno por ellas definidas y el punto de salida que es generalmente el sitio más bajo de la cuenca.

La curva hipsométrica puede representar una zona donde predomina el transporte (ríos jóvenes) o bien, deposición de sedimentos (ríos viejos) o una zona donde predominan ambos (ríos maduros).

El gráfico 14, presenta la curva hipsométrica del río El Portillo, está de acuerdo a la clasificación propuesta por Custodio & Llamas (1983), el río El Portillo se clasifica como, río en etapa de vejez, donde predominan la deposición de sedimentos.

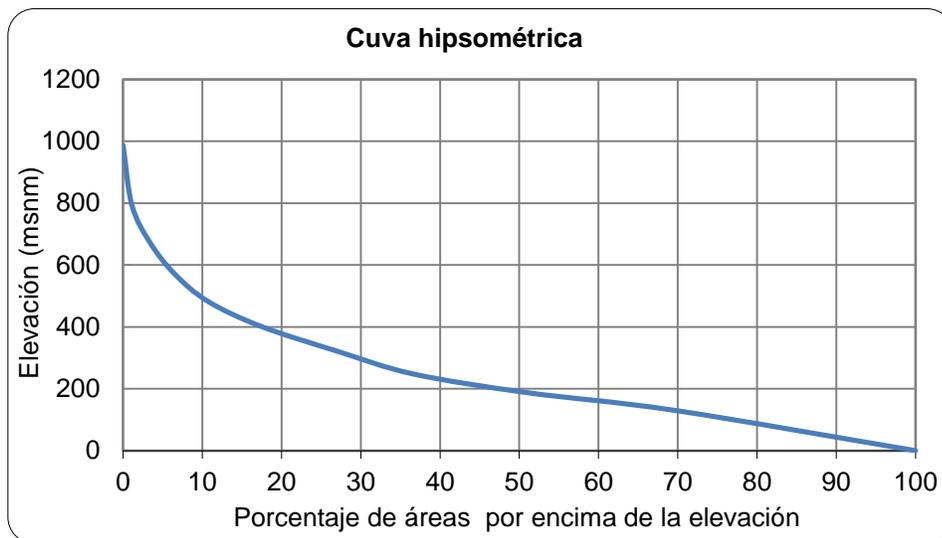


Gráfico 14. Curva hipsométrica río El Portillo

El gráfico 15, muestra el perfil longitudinal del río El Portillo, se aprecia que en su recorrido comienza a perder altitud, teniendo tiempos de concentraciones instantáneos, presentando altas velocidades y rápido descenso. Es así que cuando llega a la cota 200 hasta los 99 msnm tiende a tener un tiempo de concentración más prolongado coincidiendo con las bajas elevaciones y el predominio de la planicie que impera en la zona del valle.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

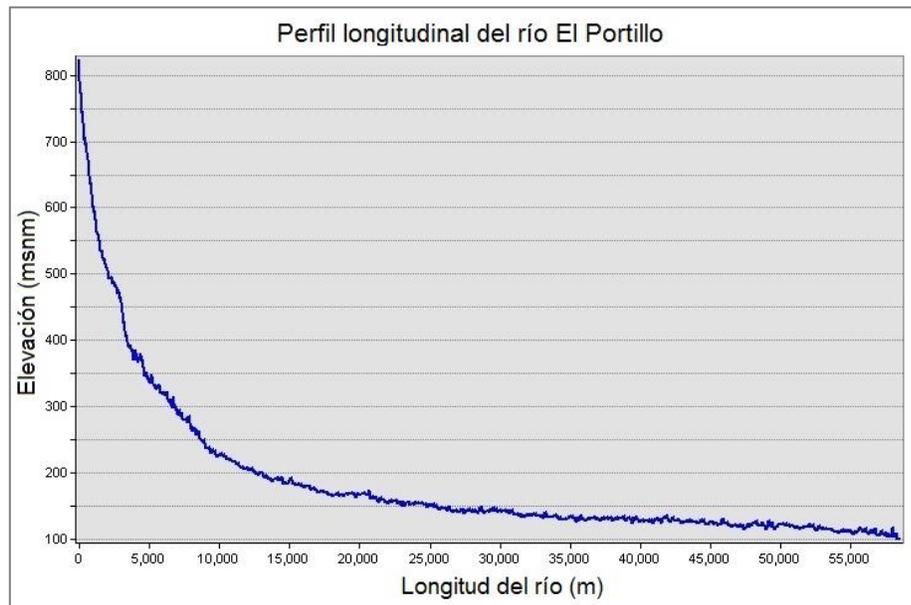


Gráfico 15. Perfil longitudinal del río El Portillo

En la tabla 16, se presenta la recopilación de los parámetros morfométricos que presenta la cuenca El Sauce.

Tabla 16. Parámetros morfométricos de la cuenca El Sauce

Parámetros	Simbología	Valor
Área (km ²)	A	367.07
Perímetro (km)	P	95.50
Longitud del río principal (km)	L	59.25
Longitud total de ríos (km)	Li	407.71
Elevación máxima (msnm)	Hmáx	1,113
Elevación mínima (msnm)	Hmín	99
Elevación media (msnm)	Hmed	285.83
Tiempo de concentración (hrs)	Tc	3.86
Densidad de drenaje (km/km ²)	Dd	1.11
Frecuencia de ríos	Ríos/km ²	0.23
Factor forma	Ff	0.105
Pendiente media del río (m/m)	lc	0.11

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Parámetros	Simbología	Valor
Pendiente media de la cuenca (m/m)	Ip	0.017
Coeficiente de compacidad	Kc	1.40
Coeficiente de torrencialidad	Ct	0.35
Lado mayor del rectángulo	LM	38.12
Lado menor del rectángulo	Lm	9.63

4.3.2 Caudales de ríos

El lecho del río principal en la parte alta, está conformado por las rocas andesíticas del Grupo Coyol Inferior, en la parte media de detritos y arenas, mientras en la zona de descarga están presentes las rocas del intrusivo granodioríticas, muchas de esta expuestas en forma de bloque que sobresalen con respecto al lecho del río, los distintos medios geológicos ante mencionados y pendientes del lecho, condicionan las velocidades de los flujos, presentando las partes alta de la cuenca las mayores velocidades. De acuerdo a los sitios de aforos se registraron velocidades entre 0.02 - 0.96 m/s, (anexos 2.2 – 2.6).

En tabla 17 se muestran los caudales obtenidos en las distintas campañas de aforos realizada en épocas seca y lluviosa en el río principal y tributarios.

Tabla 17. Caudales en época seca y lluviosa en la cuenca El Sauce

ID	Río	Sitio	Caudales época seca (m ³ /s)			Caudales época lluviosa (m ³ /s)	
			abr-13	ene-14	abr-17	oct-13	oct-17
A1	El Portillo, parte baja	Los Encuentros	0.19	1.85	0.12	26.37	21.42
A2	El Portillo, parte media	Llano Palma de Lora	0	0.10	0	9.76	7.54
A3	San José	San José	0	0.15	0	1.68	1.36
A4	La Palma	Eduardo Contreras	0	0.30	0	4.13	3.45
A5	Quebrada Seca	La Esperanza	0.06	1.10	0.04	8.14	6.98

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Con respecto al comportamiento de los caudales en la cuenca, en la época seca la mayoría de los ríos reducen considerablemente su flujo, quedando al final de la época secos a excepción del río Quebrada Seca y El Portillo en la parte baja, ambos de régimen permanente; en cambio en el periodo lluvioso, conservan su caudal y presentan crecidas torrenciales, en respuesta a los eventos pluviométricos.

Para determinar la dinámica de los ríos influenciada por la estación seca y lluviosa, se consideró los registros obtenidos para el 2017. La valoración de los caudales registrados en la época seca y lluviosa de 2017 se presenta en la figura 26

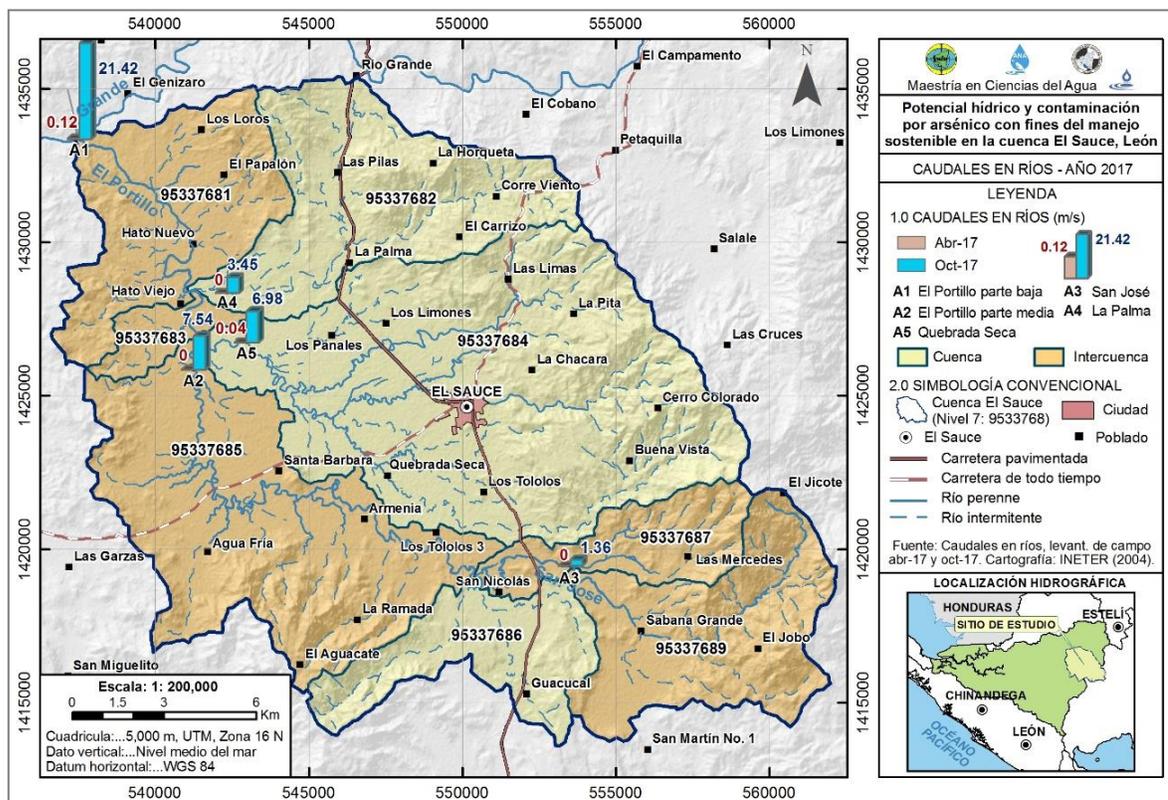


Figura 26. Mapa de caudales en ríos, época seca y lluviosa de 2017

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

En el gráfico 16, se presenta la dinámica del río principal, evaluada en tres sitios, mostrando un comportamiento típico en el periodo lluvioso, presentando los menores caudales en la parte alta y aumentando hacia la zona de descarga.

En el periodo lluvioso del año 2017, el río El Portillo en la localidad de Los Encuentros ubicada en la desembocadura del río, presentó un caudal de 21.42 m³/s (1.851 Mm³/d), en cambio al final de la época seca es de 0.12 m³/s (0.010 Mm³/d).

La sección evaluada de río en la época lluviosa corresponde a 44.60 m, con profundidad y velocidad promedio de 0.78 m y 0.52 m/s; mientras en época seca con una sección de 6.70 m, profundidad de 0.15 m y velocidad promedio de los flujos de 0.09 m/s, (anexos 2.5 y 2.6).

En la parte alta de la cuenca (sitio San José, gráfico 16), en el periodo lluvioso se obtuvo un caudal de 1.36 m³/s (0.118 Mm³/d), mientras en la época seca fue nulo.

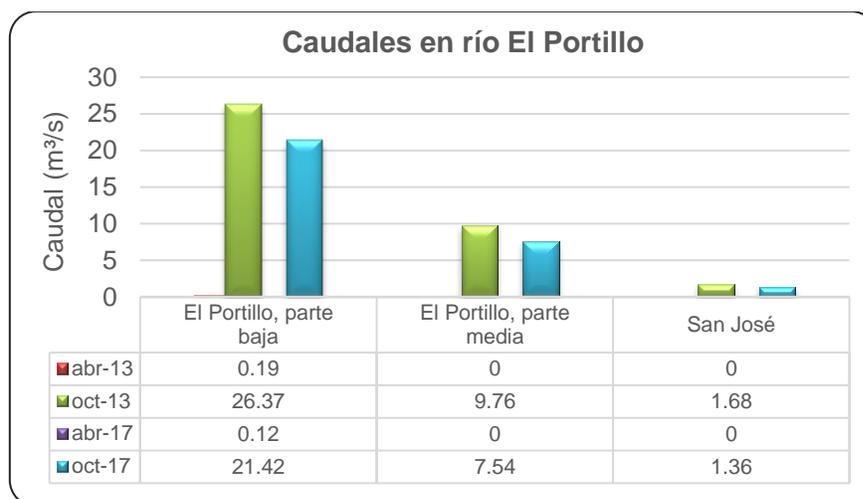


Gráfico 16. Caudales en río principal (río El Portillo), época seca y lluviosa de 2013 y 2017

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

De acuerdo al gráfico 17 el tributario con mayor caudal es Quebrada Seca, en periodo lluvioso presento 6.98 m³/s (0.603 Mm³/d), mientras en época seca 0.04 m³/s (3,456 m³/d).

El caudal del río Quebrada Seca para el periodo lluvioso fue determinado a partir de una sección de 19.90 m, profundidad y velocidad media de 0.32 m y 0.891 m/s, en cambio en época seca la sección fue de 8.6 m de ancho, 0.15 de profundidad y con una velocidad promedio de los flujos de 0.024 m/s.

El tributario La Palma presento 3.45 m³/s (0.298 Mm³/d) y en época seca este fue nulo, no presentando escurrimiento superficial.

La diferencia de los caudales determinados entre los tributarios puede obedecer a las áreas de drenaje, donde el río Quebrada Seca representa el 31.79% del área total de la cuenca El Sauce, mientras el área de drenaje compuesta del río La Palma representa el 13.13%.

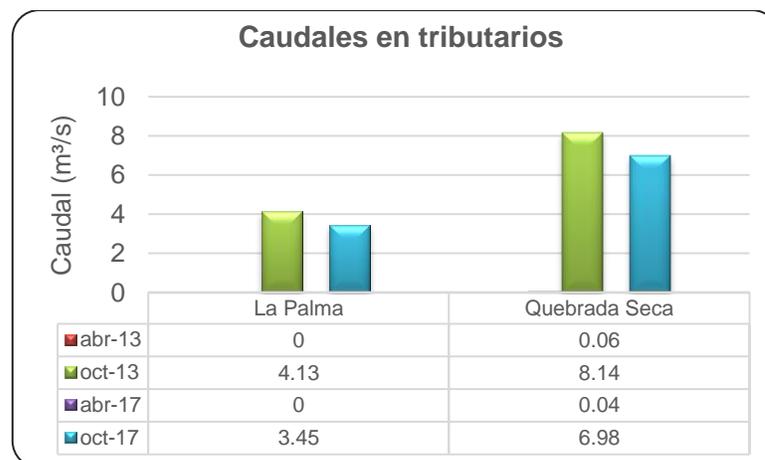


Gráfico 17. Caudales en tributarios, época seca y lluviosa de 2013 y 2017

Al comparar los caudales determinados para abril y octubre del 2013 y 2017 en el río principal y tributarios, se observó en general reducción de estos en el tiempo, no obstante, este podría ser atribuido a la variación de las precipitaciones en el tiempo en que se obtuvieron los datos *in situ*, esto probablemente por la ocurrencia de menor precipitación ocasionada por las diferentes acciones que deterioran el sistema de la cuenca, siendo la de mayor impacto la deforestación.

Al valorar las precipitaciones en el tiempo, abordado en subacápite 4.2.1 y con base al gráfico 10, los tres años que anteceden al 2013, se componen de 2 años Niñas (2010 y 2011) y un neutro (2012), en cambio para el año 2017, preceden dos años neutros (2014 y 2016) y un Niño (2015), causando disminución en los caudales de los años evaluados.

4.3.3 Caudales base en la cuenca

Los caudales base fueron determinados a partir de las estimaciones encontradas en los aforos realizado en abril de 2013, enero 2014 y abril 2017.

Con base al gráfico 18, se observa que las secciones de los ríos evaluados en el mes de enero presentan flujo base, no presentándose esta condición en abril, ya que parte de estos, no presentan caudal base al final de la época seca.

Al relacionar los caudales estimados en enero de 2014 en la parte alta (San José) y media del río principal (río El portillo, parte media), en los que se obtuvo escurrimiento de 0.15 y 0.10 m³/s, respectivamente, de estos se nota la influencia de la rocas del Grupo Coyol andesíticas en la zona de recarga de la cuenca y que desaparece en la parte media de la cuenca, pasando a una zona apta para el potencial de infiltración, propia de los sedimentos del cuaternario.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

En cambio cuando se evalúa los caudales bases estimados para enero de 2014 en la parte media (río El Portillo, parte media) más los aportes productos de los tributarios (Quebrada Seca y La Palma) con el flujo de descarga de la cuenca (El Portillo, parte baja), de estos se obtuvo 1.50 y 1.85 m³/s, notándose un escurrimiento mayor en la zona de descarga, el cual es producto del acuñamiento que ejercen las rocas del intrusivo ácido sobre las aguas subterráneas que provienen del acuífero de mayor permeabilidad compuesto de sedimentos del cuaternario.

Considerando los caudales base estimados en 2017, donde únicamente El río El Portillo en la zona de descarga y el tributario Quebrada Seca presentan flujo base, se determinó una diferencia de 0.08 m³/s (6,912 m³/d) entre estos, indicando que en la zona de descarga de la cuenca se tiene aporte subterráneos que se integran al flujo base del río, dicha condición también se presentó en abril de 2013, obteniendo una diferencia de caudal de 0.13 m³/s (11,232 m³/d).

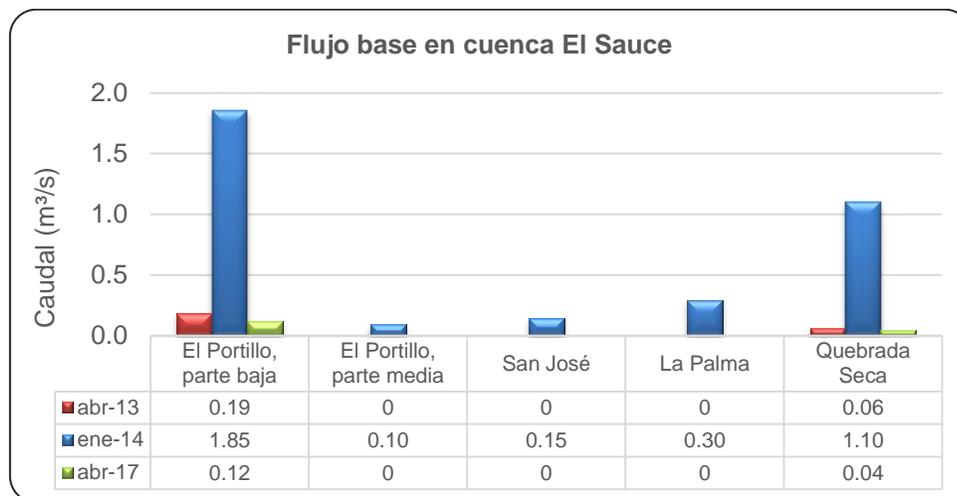


Gráfico 18. Caudales base en la cuenca, abril 2013, enero 2014 y abril 2017

El caudal base de la cuenca El Sauce fue determinado con base al sitio de aforo ubicada en la zona de descarga de la cuenca (El Portillo parte baja), obtenidos en

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

abril de 2013, enero de 2014 y abril de 2017, con escurrimientos de 0.19, 1.85 y 0.12 m³/s, respectivamente, de estos se calculó el promedio de 0.72 m³/s, equivalente a 22.706 Mm³/a, este en el balance hidrogeológico se consideró como el caudal de salida en la cuenca, (tabla 18).

Tabla 18. Caudal base de la cuenca El Sauce

ID Aforo	Río	Medición	Q (m ³ /s)	Q(m ³ /d)	Q (Mm ³ /a)
A1	Río El Portillo, parte baja	abr-13	0.19	16,416	5.992
		ene-14	1.85	159,840	58.342
		abr-17	0.12	10,368	3.784
Flujo base promedio de salida			0.72	62,208	22.706

4.3.4 Relación agua superficial - subterránea

Se valoró con relación a la época seca, las quebradas y ríos que conservan su caudal en los primeros meses, siendo influente los ríos al acuífero a partir de la curva 180 a 130 msnm, dicha condición se observó en las localidades de El Salitre, Los Limones, El Sauce, San Nicolás, donde el flujo aguas abajo se reduce hasta infiltrarse por completo.

No obstante, hay zonas que presentan condición mixta, está identificada a partir de la cota 130 hasta descender a la cota 120 msnm, entre este intervalo, algunos ríos empiezan a presentar flujo debido a la descarga de agua subterráneas, el cual es notorio con el aumento del caudal base aguas abajo, siendo el caso de río Quebrada Seca, y otros que no presentan flujo superficial, tal como es la condición del río principal desde la parte media.

Las zonas bajas presentan descarga de aguas subterráneas por debajo de la cota de 120 msnm, en esta zona el río El Portillo es efluente al acuífero, manteniendo

así el caudal base hasta la entrada del periodo lluvioso, dicha condición obedece al cambio geológico, ya que el acuífero poroso pierde potencia a medida que se aproxima a la zona de descarga, debido a que en la zona prevalece el medio fracturado compuestos por las rocas granodioritas.

4.4 Hidrogeología

Comprende la integración de los trabajos de campo y análisis de los mismo, inventario de fuentes, características del medio hidrogeológico, cuantificación de la recarga de los acuíferos, transmisividad en los depósitos cuaternarios y rocas terciarias, así como la valoración de la hidrodinámica del agua subterránea, profundidad del agua, fluctuaciones de los niveles de agua, isofreáticas del acuífero poroso, dirección del flujo y uso y consumo de agua.

4.4.1 Inventario de fuentes subterráneas

En la cuenca se registraron 30 perforados y 37 excavados, los que contienen información hidrogeológica. La mayoría de los pozos perforados son de uso comunitario, con diámetro de 4 pulgadas, gran parte de estos son aprovechados a través de bombas manuales. En otros casos, cuentan con equipo de bombeo, conectado a una red de distribución que abastece a comunidades rurales, registrando 7 pozos en el inventario. Por otra parte, forman parte del inventario 4 pozos de ENACAL, de los cuales se abastece a la población urbana de El Sauce, estos poseen diámetro de 8 pulgadas, obteniendo un total 11 pozos de bombeo que son aprovechados en la cuenca, (figura 27).

El régimen de bombeo de los pozos comunales oscila entre 4 a 8 horas al día, mientras los de ENACAL operan de 18 – 24 horas; registrando mayor tiempo de

bombeo en los meses de verano, información que fue obtenida a través de las consultas realizadas a los operadores de pozos.

En parte baja a media del acuífero poroso se inventariaron dos piezómetros, ubicados en la Esperanza y al sur de Hato Viejo, con diámetros de dos pulgadas y con profundidades de 75.30 y 59.35 m, respectivamente.

En cuanto a los pozos excavados, se registraron pozos privados, estos son usados para ingesta y en las actividades domésticas.

Los pozos perforados se concentran en la parte sureste de la cuenca, aprovechando al acuífero poroso entre las cotas 110 – 200, y por encima de los 200 msnm se encuentran en un medio fracturado, (figura 27).

Los pozos perforados poseen profundidades desde los 24.40 – 74.70 m, en Las Pilas y San José, localizadas en los sectores norte y sureste, respectivamente. En tanto, los pozos excavados oscilan de 4.30 m en Hato Nuevo a 20.20 m en la localidad San José. En cuanto a las profundidades promedio, en los pozos perforados presentan 47.0 m, mientras los excavados se registran de 11.20 m.

En la parte alta de la cuenca, los pozos son escasos, se ubican principalmente a lo largo de los accesos que conducen hacia Estelí y Achuapa, ante esto, las comunidades ubicadas en las zonas altas, se abastecen con otras fuentes, siendo estos manantiales, de los cuales, se registran 12 captaciones establecidas como mini acueducto por gravedad (MAG), presentando la mayor concentración en la parte noreste y este de la cuenca, (figura 27). La base de datos de estos fue proporcionada por la alcaldía municipal El Sauce (2018).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Cabe mencionar que en la cuenca existen otros pozos que no forman parte del inventario, entre los que se identifican pozos comunales equipados con bombas manuales, pozos excavados para el abrevadero de ganado bovino y otros de uso agrícola (irrigación de distintos cultivos, sobresaliendo entre estas plantaciones de musáceas y árboles frutales).

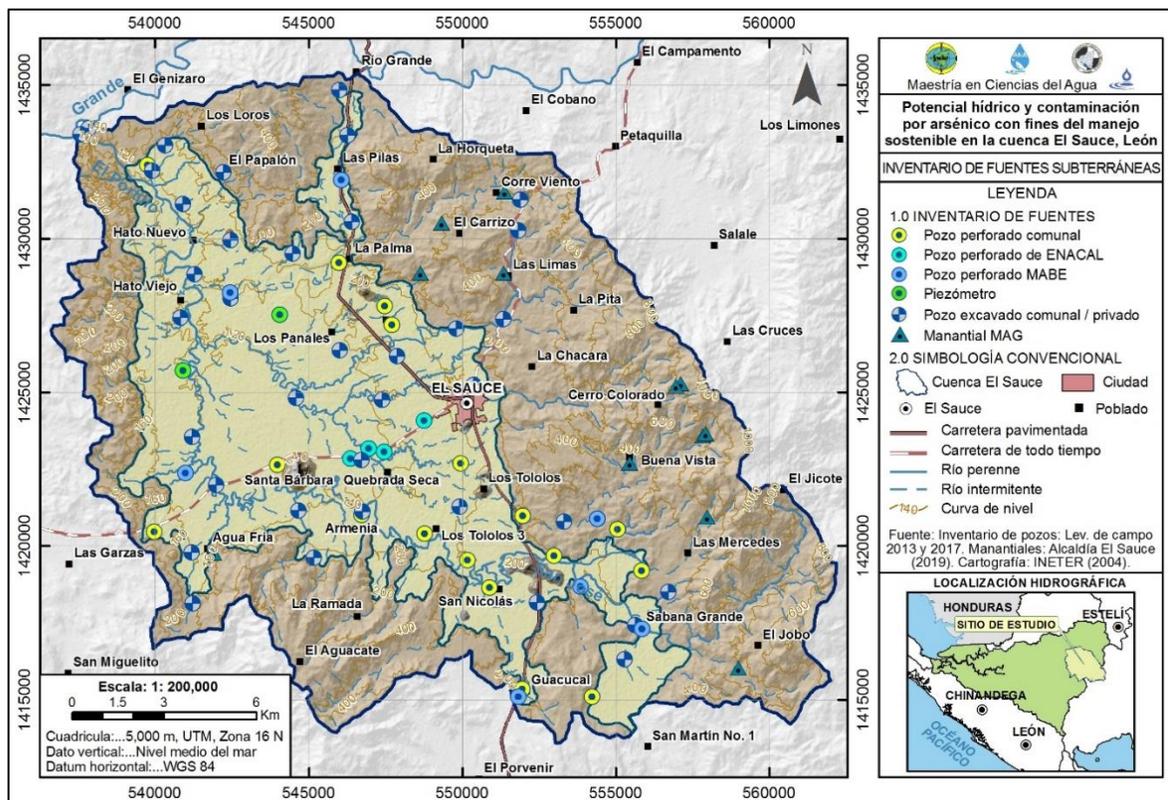


Figura 27. Mapa de inventario de fuentes subterráneas

4.4.2 Medio hidrogeológico

La cuenca El Sauce, tiene una extensión total de 367.07 km², con evidencia de importancia económica por la cantidad y calidad de las aguas, para el desarrollo de la ciudad El Sauce. El área del valle, corresponde a la acuífera porosa, esta con una superficie 141.80 km², con pendiente plana a moderadamente inclinada.

El acuífero poroso está compuesto de sedimentos aluviales y residuales producto de la meteorización de las rocas del terciario, con espesores promedio de 46 metros, donde se almacenan y transportan las aguas subterráneas que proceden desde las laderas, (INETER, 2008).

En tanto que, las zonas de laderas y escarpadas cubren 225.27 km² de la unidad hidrológica, compuestas de rocas del terciario, con un intenso fallamiento; condición geológica que da origen a acuíferos fracturado aislados.

El límite inferior del acuífero poroso está en contacto con las rocas de baja permeabilidad, conformado por el Grupo Coyol inferior (Tmc) y el intrusivo ácido granodiorita (Tia), con menor extensión hacia el área noroeste, en zona de descarga de este acuífero, (figura 28).

4.4.2.1 Unidades del medio hidrogeológico

El acuífero poroso se formó de acuerdo a los procesos de intemperismo de las rocas del periodo terciario y cuaternario, de la alteración de las rocas del Grupo Coyol inferior y superior, que se encuentran formando la geomorfología del paisaje en la zona superior de la cuenca de estudio.

Atendiendo la geomorfología, el acuífero es considerado intramontano, de poco espesor y en condiciones libre, concentrándose la composición litológica de arenas, gravillas, arcillas, limos y bolones; los cuales recubren las rocas terciarias que podrían alcanzar hasta los 89 m de espesor, según figuras 29 y 31.

El aporte hídrico procedente de las zonas fracturadas ubicadas en la parte alta del acuífero, depende del grado de fracturación, alteración y meteorización de las rocas del periodo terciario, donde se localizan zonas sedimentarias relativamente poco

profundas aisladas, las que están relacionados con el intenso fracturamiento de las rocas.

De esta composición litoestratigráfica se derivan las siguientes unidades del medio hidrogeológico en la cuenca y acuífero del valle El Sauce.

- **Sedimentos cuaternarios**

Los pozos perforados con fines de explotación hídrica, ubicados en las localidades de Quebrada Seca, Esquipulas y Eduardo Contreras; la litología corresponde a una secuencia de intercalación de capas moderadamente permeables, dando origen a un acuífero libre, esta secuencia se describe como arenas con granulometría media a fina, limos arenosos, permitiendo el transporte y almacenamiento de agua, (anexo 4.1).

Estos sedimentos son producto de la meteorización y erosión de las rocas, y su posterior deposición en las partes bajas, así como suelos residuales de rocas altamente alteradas. Según el estudio de INETER (2008), estos tienen poco espesor el cual oscila entre 3 a 89 m aproximadamente, (figuras 29, 30 y 31).

- **Rocas del Grupo Coyal**

Subyacen al acuífero poroso en gran parte de la extensión del valle, presentando una reducción en la producción de las aguas subterráneas, el movimiento de los flujos de agua se da a través de fracturas y fallas que presentan las rocas. Según el estudio de INETER (2008), el medio de rocas del terciario fracturadas, meteorizadas y alteradas corresponde a dacitas (Tmcd), andesitas (Tmca), y ignimbríticas dacíticas (Tmcid).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

• Rocas Intrusivas (Tia)

Estas pertenecen al núcleo Paleozoico, representan una zona de transición montañosa central y provincia volcánica sur, (Hodgson, 1972). Subyacen al acuífero poroso en el sector noroeste de la cuenca, y están expuestos en el sector Hato Nuevo; es un medio de menor producción de aguas subterráneas, en comparación con a las rocas del Grupo Coyol; ya que se trata de rocas más densas y con menor grado de fracturamiento.

En la figura 28, se presentan la distribución espacial del acuífero poroso y fracturado, así mismo representando en perfil longitudinal (figura 29) y dos transversales (figuras 30 y 31).

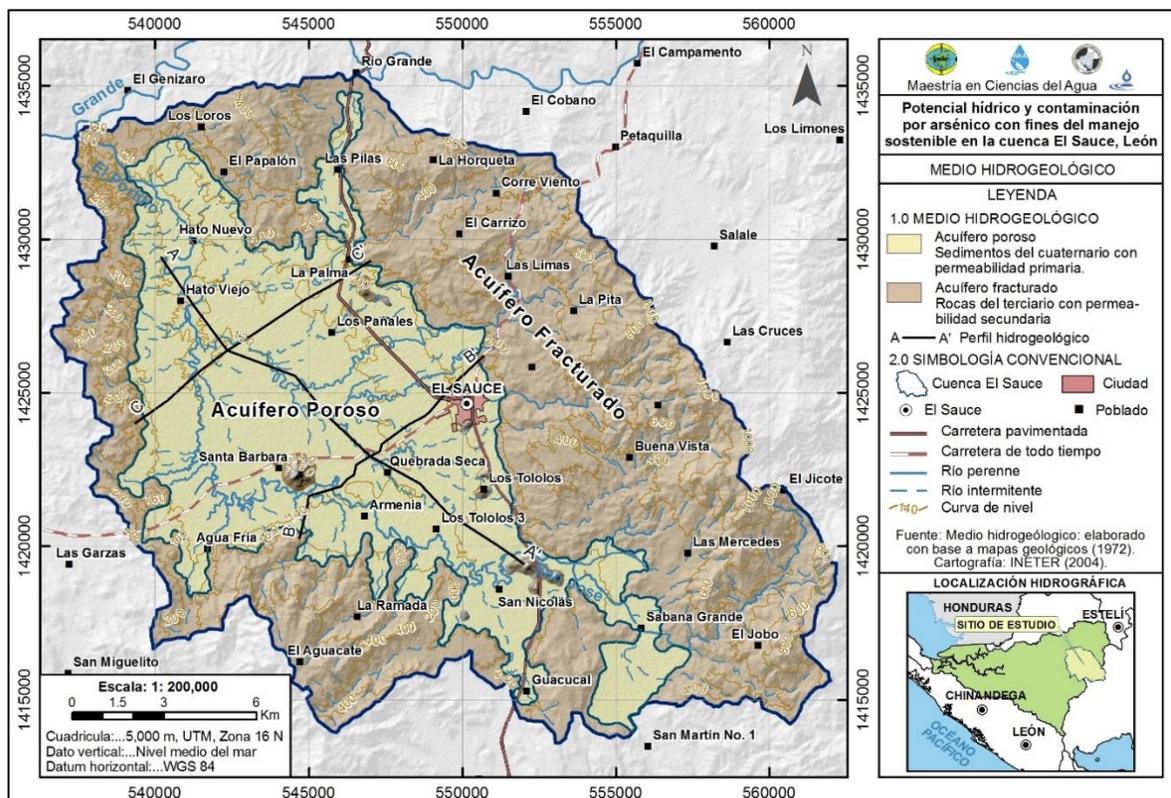


Figura 28. Mapa de medio hidrogeológico de la cuenca El Sauce

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

De acuerdo a las figuras 29, 30 y 31 el acuífero poroso y libre presenta en la zona central mayor potencia disminuyendo hacia las proximidades de los afloramientos de las rocas terciarias, adyacentes al valle. Los estratos más profundos de los pozos perforados y piezómetros corresponden al medio fracturado de las rocas del Grupo Coyol.

El corte longitudinal (figura 29) muestra los flujos procedentes de la zona alta compuesta por rocas del Grupo Coyol que escurren subterráneamente hacia al noroeste en zona de descarga de la cuenca, el medio hidrogeológico de menor permeabilidad y más profundo se compone en la parte media a alta del valle de rocas del Grupo Coyol Inferior, mientras en la zona baja de la cuenca de las rocas intrusivas ácidas granodioritas.

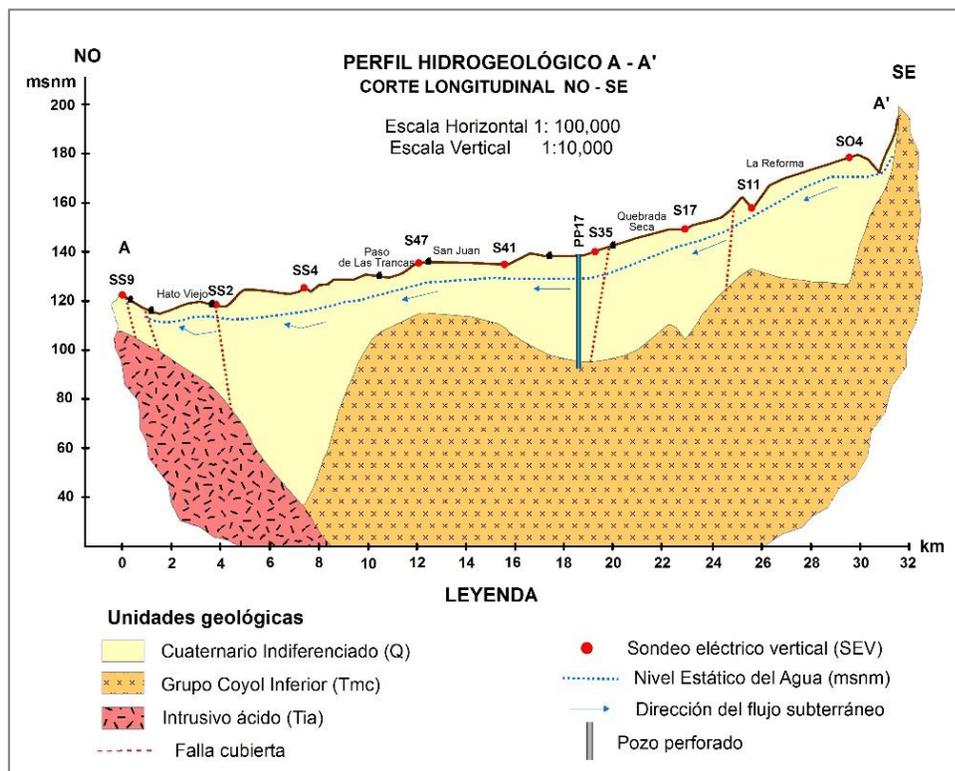


Figura 29. Perfil longitudinal hidrogeológico A - A'

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

En cuanto a los cortes transversales (figura 30 y 31) presenta la convergencia de flujos de agua subterránea procedente del noreste y suroeste, para ambas secciones el medio de menor permeabilidad corresponde a las rocas del Grupo Coyal inferior.

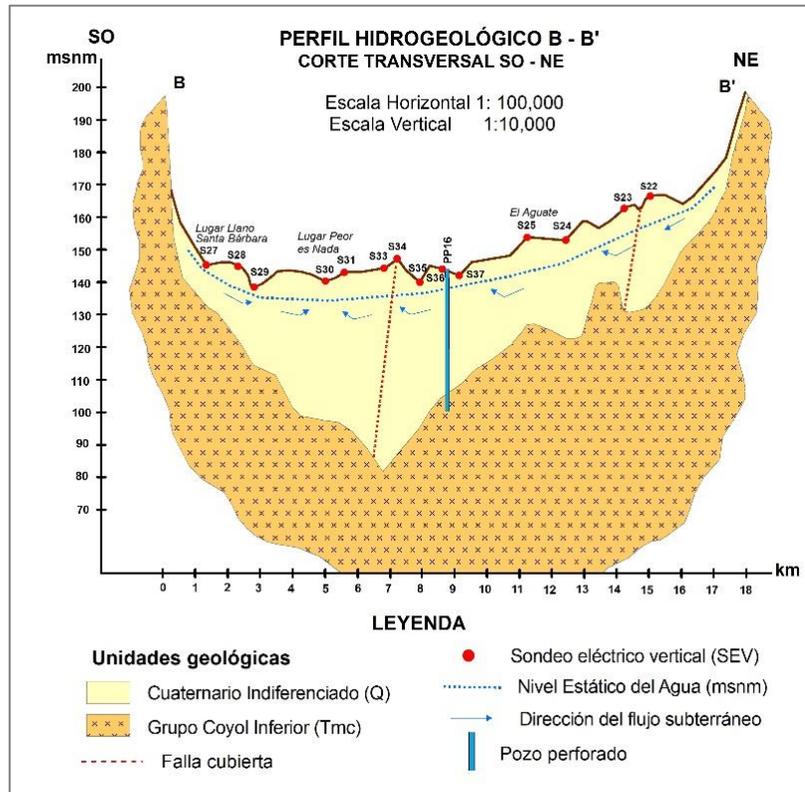


Figura 30. Perfil hidrogeológico transversal B - B'

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

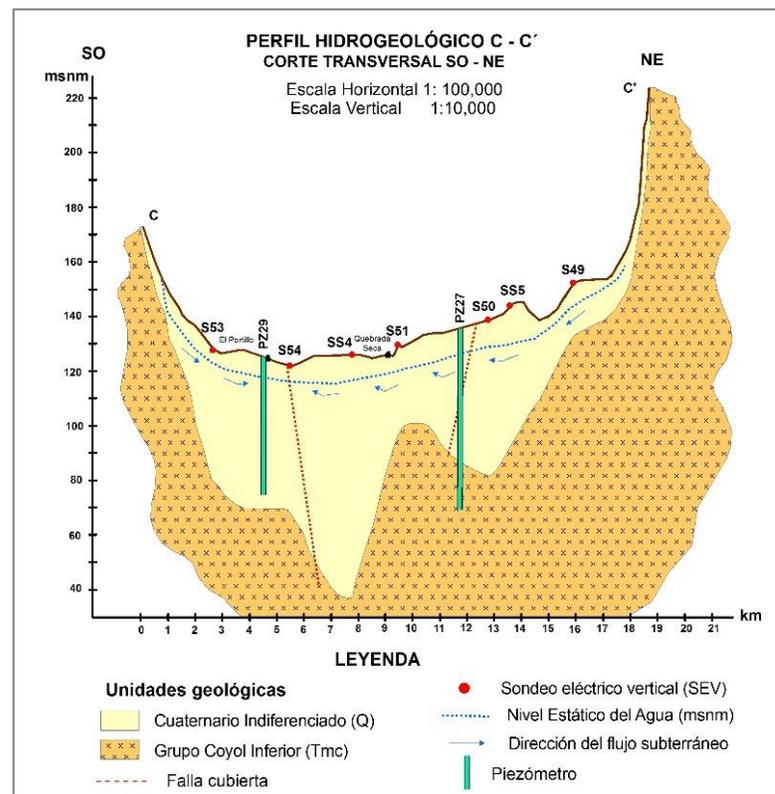


Figura 31. Perfil hidrogeológico transversal C - C'

4.4.2.2 Basamento hidrogeológico

Con base al registro de 68 sondeo eléctricos verticales realizados por INETER (2008), se obtuvieron los espesores permeables de los sedimentos, distribuidos en el valle; a partir de estos se obtuvo la representación del basamento geológico, además, se consideró información litológica de pozos perforados que en un tiempo formaron parte de la red de distribución de ENACAL, ubicados al suroeste de ciudad El Sauce. Esta información contribuyó a valorar la profundidad de los estratos consolidados que representan el basamento.

La mayor profundidad del basamento se encuentra en la localidad Llano Palma de Lora, alcanzando los 89 m. Otro sitio considerable se ubica en el sector de Yugo

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Quebrado con 62 m, sector donde se ubican los pozos de ENACAL. Hacia las zonas adyacentes en el acuífero facturado, el basamento hidrogeológico esta entre los 15 a 10 m, de igual manera en el entorno sur de la ciudad El Sauce, donde los afloramientos de las rocas del Grupo Coyol están expuestas a la superficie, (figura 32).

Con base a los espesores permeables obtenidos a través de los sondeos geofísicos realizado por INETER (2008), la profundidad promedio a la que este se encuentra el basamento es de 32 m, (anexo 4.2)

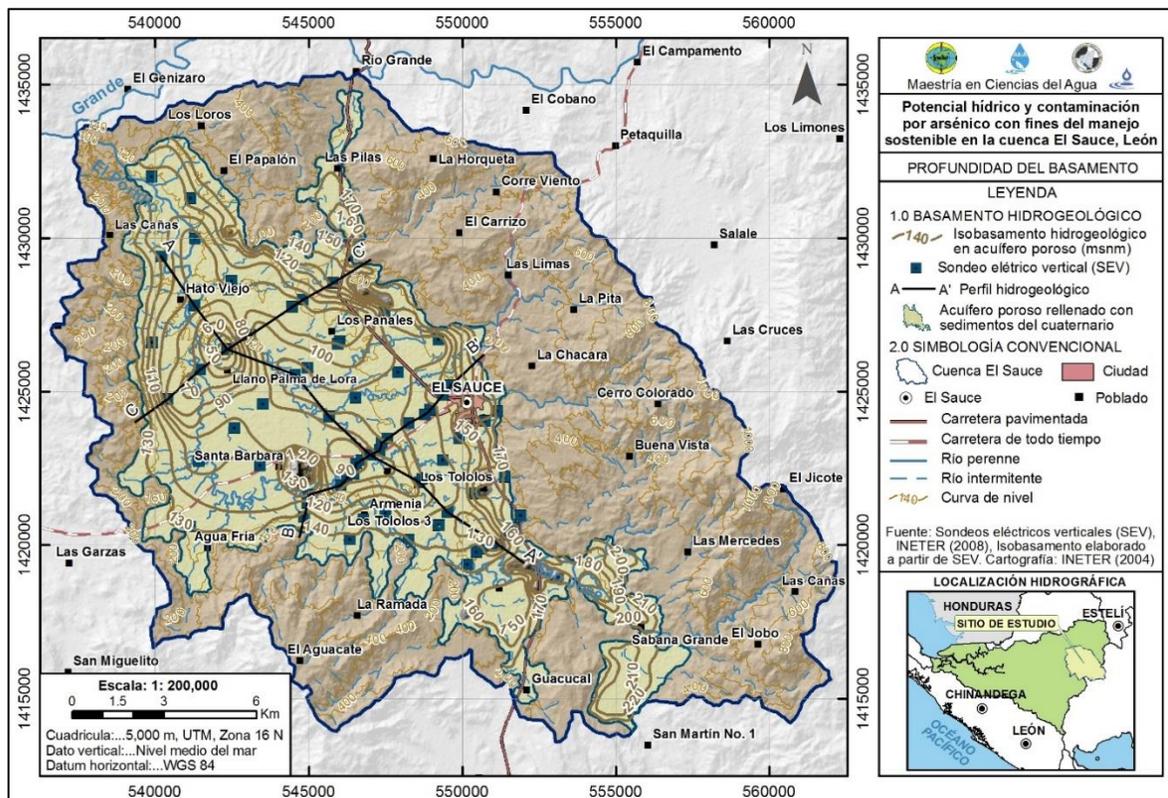


Figura 32. Mapa de profundidad del basamento hidrogeológico de la cuenca El Sauce

4.4.3 Infiltración de las aguas en los suelos

La capacidad de infiltración del agua estimada en los suelos oscila entre los 4.77 a 22.96 mm/h, registrando los mayores valores en la localidad de Gallo Solo, en cambio, las menores magnitudes se presentaron en Llanos Palma de Lora y Santa Bárbara, donde los suelos son de textura arcillosos a limosos, (anexo 5.1).

Los valores de la capacidad de infiltración (f_c) de los suelos varían significativamente en el área del valle y es influenciada por factores como la textura del suelo, la estructura, la consistencia, el tamaño de los poros, las raíces de las plantas y el uso del suelo.

En figura 33, se muestra los valores de capacidad de infiltración del agua estimada en los suelos de la cuenca, así mismo, representando el número ID para las pruebas de infiltración realizadas, (anexo 5.1).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

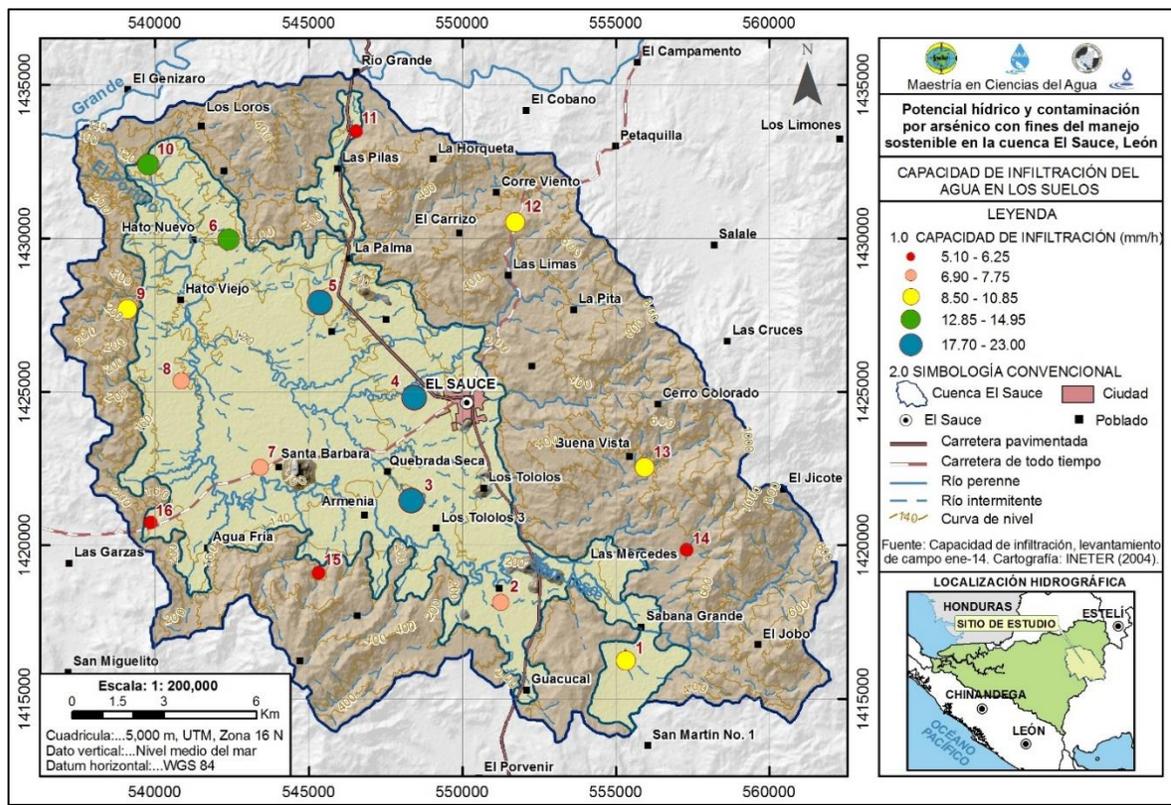


Figura 33. Mapa de capacidad de infiltración del agua en los suelos (fc)

4.4.4 Zonificación de recarga natural

Las zonas de recargas acuíferas fueron definidas por los diferentes tipos de suelos en el área, la geología y la pendiente del terreno; agrupada principalmente con las dos últimas características. El tipo de formación geológica determina el material litológico que origina la composición de los suelos.

De acuerdo al análisis de las características físicas indicadas se determinaron seis zonas de recarga directa (ZRD), cada una con el tipo de suelos predominante. En la figura 34, se presentan las zonas de recarga y texturas de suelos identificadas, ZRD1: franco arcilloso y franco limoso, ZRD2: franco arcilloso y arcillo limoso, ZRD3:

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

arcillo limoso y arcillo arenoso, ZRD4: franco y franco limoso, ZRD5: arcilloso y ZRD6: arcillo arenoso.

A través del balance hídrico de suelos se obtuvieron valores de recarga para cada textura de suelo con prueba de infiltración. De estas, se determinó el valor medio de recarga, por igual textura y cantidad de la misma, dentro de la zona de recarga. Estas se expresan en milímetros por año.

La tabla 19, contiene un resumen del resultado del balance hídrico en los suelos, con el cual se determinó el valor de la recarga natural.

Tabla 19. Resultados del balance hídrico de suelo por zona de recarga

ZRD	Textura	K _{fc} Prom. (mm/d)	P (mm/a)	PI (mm/a)	ETP (mm/a)	Formación litológica	RP. Prom. (mm)	RP (%)
Zona 1	Franco arcilloso	55.94	1804.3	1000.91	1647.1	Grupo Coyol Inferior	227.13	12.59
	Franco limoso	95.47	1804.3	1182.28	1647.1	Grupo Coyol Inferior	345.43	19.15
Zona 2	Franco arcilloso	70.87	1627.6	1085.44	1647.1	Cuaternario Indiferenciado, Grupo Coyol Inferior y Superior	230.54	14.16
	Arcillo limoso	58.69	1627.6	1059.15	1647.1	Cuaternario Indiferenciado, Grupo Coyol Inferior	211.62	13.00
Zona 3	Arcillo limoso	47.98	1721.1	921.84	1647.1	Grupo Coyol Inferior y Superior	169.98	9.88
	Arcillo arenoso	102.78	1721.1	1281.43	1647.1	Grupo Coyol Inferior, Intrusivo ácido	320.04	17.00
Zona 4	Franco limoso	138.79	1879.7	1500.00	1647.1	Cuaternario Indiferenciado	557.04	29.11
	Franco	183.71	2129.3	1379.54	1647.1	Cuaternario Indiferenciado	449.96	27.64
Zona 5	Arcilloso	40.32	1925.2	1239.85	1647.1	Cuaternario Indiferenciado	344.59	17.62
Zona 6	Arcillo arenoso	94.71	1882.1	1245.95	1647.1	Intrusivo ácido, Grupo Coyol Inferior	342.80	18.21

Las características de las seis zonas de recarga identificadas por agrupación de suelos según texturas similares, composición geológica y pendiente del terreno, se describen a continuación:

Zona de recarga directa 1

Con una recarga promedio de 286.28 mm, equivalente al 15.87% de precipitación media de 1804.3 mm de la cuenca El Sauce. En esta zona predominan los suelos francos arcillosos y francos limosos. Son originados por la descomposición de la roca terciaria de la formación geológica Coyol inferior, con litología de rocas volcánicas, dacíticas y andesíticas.

Posee un área de 139.36 km², presenta las mayores pendientes, de inclinadas a escarpada, cobertura predominante de vegetación arbustiva; seguido de tacotales en la parte este y de mayor elevación, en donde se presentan pequeñas áreas dispersas compuestas por bosque de conífera.

Zona de recarga directa 2

La recarga promedio es de 221.08 mm, equivalente al 13.58% de la precipitación, que es de 1,627.6 mm, correspondiente a la estación Los Tololos.

Cubre un área de 29.53 km², en esta predomina la cobertura de vegetación arbustiva y pastos. De suelos franco arcilloso, arcillo limoso y arcilloso; con pendiente desde ligeramente plana a moderadamente escarpada.

Son suelos formados por rocas terciarias del Grupo Coyol Inferior y Superior, con litología de rocas andesíticas e ignimbritas en las partes altas, mientras en las partes de pendiente ligeramente plana se tiene suelos residuales, formada por arcillas, limos y arenas.

Zona de recarga directa 3

La recarga promedio es de 245.01 mm, equivalente al 13.44% de la precipitación media de 1721.1 mm, correspondiente a la estación meteorológica El Pilón.

Esta zona se constituye principalmente de suelos arcilloso limosos, además, de arcillo arenosos; con menor cobertura al noroeste de la cuenca. Se caracterizan por la descomposición de la roca terciaria de la formación Grupo Coyol Inferior y Superior, con litología formada por rocas volcánicas, ignimbritas dacíticas, andesitas y lavas andesíticas.

Posee un área de 49.03 km², con pendientes de terrenos de inclinado a moderadamente escarpado. La cobertura predominante en esta zona se compone de tacotales y vegetación arbustiva.

Zona de recarga directa 4

Las texturas y pendientes contribuyen a obtener la mayor recarga potencial en esta zona, siendo de 503.50 mm, equivalente al 28.38% que es de 2,004.5 mm, correspondiente a la media de cuatro estaciones meteorológicas con área de influencia dentro de la zona (Los Tololos, El Pilón, Laguneta y Los Loros). Posee un área de 76.85 km², la que presenta cobertura predominante correspondiente a cultivos anuales.

Presenta suelos francos y franco limoso, originado por la meteorización de la formación cuaternario residual y aluvial, con litología formada por arenas, bolones limos y arcillas, con pendiente del terreno plana a ligeramente inclinado.

Zona de recarga directa 5

La recarga promedio es de 344.59 mm, equivalente al 17.62% de la precipitación media de 1,925.2 mm obtenida de las estaciones El Pílon y Laguneta.

Esta zona presenta suelos arcillosos y arcillo limosos, y al igual que la zona anterior, los suelos son de origen volcánico cuaternario residual y aluvial, con litología formada por arcillas, limos, arenas y bolones; dicha litología se ubicó en taludes del río El portillo en el sector Llano Palma de Lora.

Se caracteriza por presentar las menores pendientes de la cuenca y acuífero en estudio, de plana a ligeramente inclinada. Posee un área de 39.74 km², la cobertura predominante corresponde a pasto.

Zona de recarga directa 6

La recarga promedio es de 342.80 mm, equivalente al 18.21% de la precipitación, que es de 1,882.1 mm obtenida de la estación Los Loros. Cubre el área de 32.56 km², al noroeste de la cuenca en la descarga, posee suelos arcillosos arenosos, originados por la meteorización del intrusivo ácido granodiorítico, con pendiente de plana a modernamente escarpado, predominando la vegetación arbustiva y pasto.

4.4.5 Recarga directa promedio de la cuenca

Del análisis anterior, se deriva una recarga promedio de la cuenca y acuífero, de 323.88 mm, representado el 17.95% de la precipitación media de la cuenca (1,804.3 mm), determinando 121.98 Mm³ de recarga anual para el periodo evaluado.

En tabla 20, se muestran los valores de recarga expresado en mm, áreas y volumen de recarga de las aguas subterráneas por zonas de recarga.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Tabla 20. Volumen de recarga potencial media anual por zona de recarga

Zona Recarga	Textura	Área Recarga (km ²)	RP (mm)	Recarga Anual (m ³ /a)	Recarga Anual (Mm ³ /a)
ZRD1	Franco arcilloso, franco limoso	139.36	286.28	39896350.19	39.90
ZRD2	Franco arcilloso, arcilloso limoso	29.53	221.08	6528519.00	6.53
ZRD3	Arcilloso limoso, arcilloso arenoso	49.03	245.01	12012987.21	12.01
ZRD4	Franco, franco limoso	76.85	503.50	38693812.04	38.69
ZRD5	Arcilloso	39.74	344.59	13693810.98	13.69
ZRD6	Arcilloso arenoso	32.56	342.80	11161452.31	11.16
TOTAL		367.07		121986931.73	121.98

ZRD: Zona de recarga directa, RP: Recarga potencial

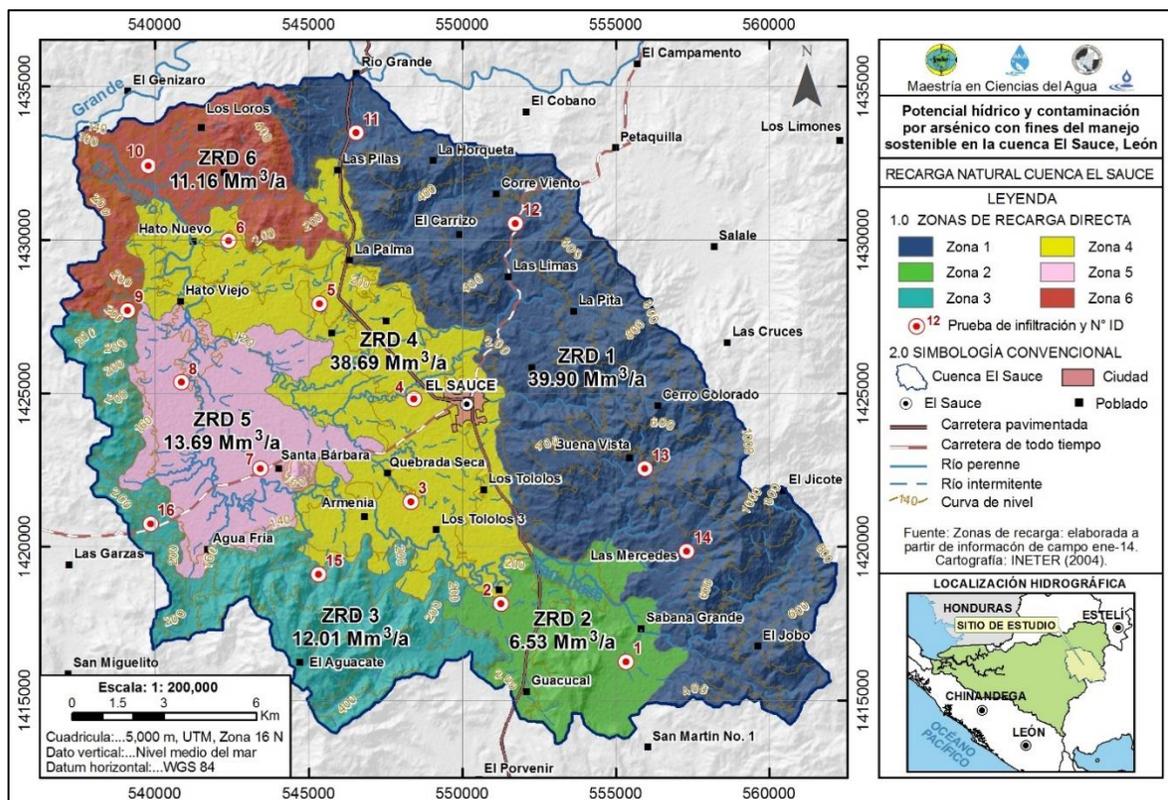


Figura 34. Mapa de zonas de recarga natural de la cuenca El Sauce

4.4.6 Recarga por retorno

El agua para uso doméstico y consumo humano es de 1.11 Mm³/a, correspondiente a extracciones por bombeo, a partir de este, se obtuvo un volumen por retorno de pérdidas en el sistema de redes de agua potable de 0.22 Mm³/a, (anexo 8.1).

En cuanto a los volúmenes de aguas empleadas en 77.82 ha se requieren 0.93 Mm³/a resultando un volumen anual por retorno de riego de 0.28 Mm³/a. El volumen total por retorno al acuífero es de 0.50 Mm³/a, (anexo 8.5).

4.4.7 Características hidráulicas del acuífero

La distribución de los sitios evaluados, se concentran en el sector de Quebrada Seca, donde están los pozos de ENACAL; de manera puntual se ubican otros en las comunidades de San José y Las Pilas, en zonas adyacentes al acuífero poroso.

En tabla 21, se presentan datos de las principales características hidráulicas en el acuífero El Sauce.

Tabla 21. Parámetros hidráulicos del acuífero El Sauce

No. Pozo	Localidad	b (m)	Q (m ³ /h)	tb (h)	s (m)	T (m ² /d)	k (m/d)	q (m ³ /h/m)
PP32	Arlen Siu	51.73	49.96	32	13.38	78.12	1.5	3.7
PP16	Quebrada Seca	33.51	49.96	12	5.02	201.5	6.0	10.0
PP18	La Palomera	38.78	54.5	12	5.4	203.4	5.2	10.1
PP3*	San José	44	13	4	3.5	50	1.1	3.7
PP16*	Quebrada Seca	35.7	29	12	9.9	190	5.3	2.9
PP17*	Yugo Quebrado	31.1	32	24	8.7	340	10.9	3.7
PP26*	Las Pilas	18.9	8	10	2.1	60	3.2	3.8

*Fuente: PP16, PP17, PP26; INETER (2008)

b: espesor captado, Q: caudal de bombeo, tb: tiempo de bombeo, s: abatimiento, T: transmisividad, k: conductividad hidráulica, q: capacidad específica

Los pozos 32, 16, 18 y 17, son administrados por ENACAL, la prueba de bombeo de la fuente 32 data de noviembre 2015; los pozos 16 y 18 de diciembre de 2008, con respecto a los demás sitios, corresponde a resultados del estudio hidrogeológico realizado en la cuenca El Sauce por INETER (2008).

Los pozos 3 y 26 son comunales, con diámetro de 4 pulgadas en zonas adyacentes al acuífero fracturado. Los tiempos de bombeo en los pozos comunales oscilan entre 4 – 10 horas, mientras los de ENACAL de 12 a 32 horas, con diámetro de 8 pulgadas.

Para el pozo 16 se presenta resultados a partir del procesamiento de la prueba de bombeo facilitada por ENACAL y realizada en diciembre de 2008, así mismo se contó con la del estudio de INETER (2008).

4.4.7.1 Transmisividad

La zonalidades hidrogeológica establecida para la cuenca en estudio se delimitaron teniendo en cuenta la geometría del acuífero y geología de la misma.

Para la representación espacial de este parámetro en el acuífero poroso se estableció, dos zonalidades con magnitudes de 50 - 500 m²/d y 10 - 200 m²/d y una para el acuífero fracturado con transmisividades inferiores 10 m²/d. En la figura 35 se presenta la distribución espacial de este parámetro.

Las transmisividades de 50 - 500 m²/d, asociadas a las zonas de mayor potencia acuífera, se extiende en la zona central del valle; de acuerdo a los perfiles hidrogeológicos presentados en la figura 29 y 31, en la localidad Llanos Palma de Lora y sector Yugo Quebrado, se podrían presentar las mayores magnitudes atribuido al aumento del espesor del acuífero en la zona, (figura 35).

En el área de extracción de ENACAL ubicados en la comunidad de Quebrada Seca, la transmisividad oscila entre los 78 - 340 m²/d, decrece con dirección noreste, debido a que la potencia del acuífero es menor, (anexos 6.1 – 6.3). Según perfiles de pozo perforados por esta empresa, el espesor permeable corresponde a 45 m, con base a los registros litológicos de los mismos, y que en ocasión formaron parte de la red de distribución, (anexo 4.1).

En relación a las magnitudes de transmisividades de 10 - 200 m²/d, corresponde al acuífero poroso, donde la potencia del mismo es menor, debido a que las rocas terciarias están a menor profundidad; en esta zona se encuentran de manera puntual dos sitios, en la comunidad San José y Las Pilas, con magnitudes de 50 y 60 m²/d, (figura 35).

Para el acuífero fracturado se estableció transmisividad menor a 10 m²/d, inferida a partir de las unidades geológicas correspondiente al Grupo Coyol Inferior y con menor extensión el superior. Este se caracteriza por presentar un intenso fracturamiento, aumentando este parámetro a través de las estructuras (fallas y fracturas) principalmente para la zona alta noreste y este de la cuenca de estudio.

No obstante, esta decrece en la zona noroeste de la cuenca en la localidad Los Loros, debido al cambio de la unidad geológica, en la cual predominan las rocas del intrusivo granodiorítico, el cual se encuentra en un estado más denso que la formación del Grupo Coyol.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

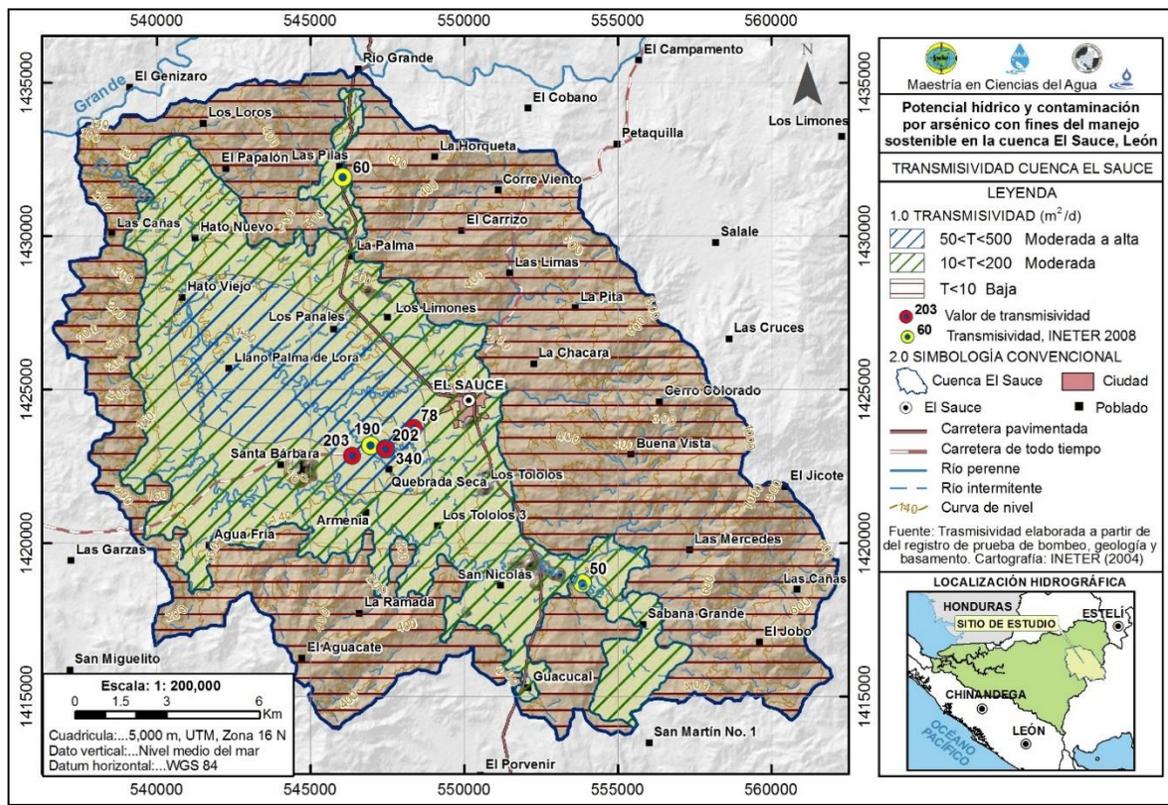


Figura 35. Mapa de transmisividades de la cuenca El Sauce

4.4.7.2 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica en el acuífero poroso ubicado en las localidades de Arlen Siu y Quebrada Seca oscila entre 1.51 – 10.93 m/d; mientras en zonas adyacente al acuífero fracturado, situados en las localidades de San José y Las Pilas este parámetro oscila 1.14 – 3.17 m/d.

Dicho parámetro tiende a decrecer dentro de zonas del acuífero fracturado y aumentar en la zona central del valle.

4.4.7.3 Capacidad específica

De acuerdo a los resultados de capacidad específica esta oscila entre 2.9 – 10.1 m³/h/m, obteniendo las mayores magnitudes en Quebrada Seca. El pozo 16 presenta datos de diferentes periodos analizados y caudal de bombeo, con magnitudes de 2.9 y 10 m³/h/m, la marcada diferencia podría deberse, al periodo en que se realizó el ensayo.

Tomando como referencia a los pozos de ENACAL, los cuales son aprovechados intensivamente, los caudales específicos promedio del acuífero podrían encontrarse entre los 5 – 12 m³/h/m, teniendo en cuenta que se capta todo el espesor del acuífero, siendo de 45 – 60 m según perfil hidrogeológico B-B', (figura 30).

4.4.7.4 Coeficiente de almacenamiento

La composición litoestratigráfica de pozos perforado en el valle El Sauce, ubicados en las localidades de San Nicolás, Esquipulas, Apangares y La Laguneta, donde el medio se compone principalmente de arenas finas a medias, limos, bolones y poca arcilla, dan origen a un acuífero libre, el cual adquirirá valores de S de 0.01 - 0.2.

Por otra parte, el almacenamiento del agua subterránea en el acuífero podría comportarse estable, según la valoración de los niveles de aguas de pozos perforados cercanos a excavados, hay una diferencia de carga hidráulica, que obedece principalmente a las diferencias de elevaciones topográficas; esto se pudo constatar a través de los niveles de los pozos PP19 y PE13, los que distan aproximadamente a 120 m entre sí, (anexos 3.1, 3.2 y 7.1).

No obstante, localmente se determinó una condición hidráulica de semiconfinamiento en la localidad de Sabana Grande, dicha zona corresponde a

una zona acuífera aislada en la parte alta, en esta zona los estratos más profundo corresponden a un medio fracturado, donde los lentes (capas) de estratos densos podrían ser la causa del semiconfinamiento, los sitios que demuestran dicha condición corresponden a los pozos PP4 y PE2, estos distan aproximadamente a 250 m entre sí, (anexos 3.1, 3.2 y 7.1).

4.4.7.5 Espesores captados en el acuífero

Estos se determinaron a partir del registro de la profundidad de pozos que fueron parte del inventario, así mismo, de perfiles estratigráficos de pozos de ENACAL y comunales.

Atendiendo la distribución espacial de los pozos de bombeo, la mayoría de estos son totalmente penetrante. Los espesores captados en pozos de ENACAL oscilan entre los 30 – 40 m. Con base al inventario de pozo, en el interior del valle se ubican 2 piezómetros con diámetro de perforación de 2 pulgadas, ubicados en La Esperanza y en Llano Palma de Lora con espesores captado de 60 y 50 m. No obstante, para el último sitio, de acuerdo a las figuras 29 y 31, el espesor saturado es de aproximadamente 80 m.

4.4.7.6 Caudales de operación

A partir del inventario de pozos, se obtuvieron los pozos de bombeo, registrando 11 pozos, de estos 4 son propiedad de ENACAL y el resto comunales.

Los caudales operación de los pozos administrados por ENACAL oscilan entre 27 a 50 m³/h, bajo un régimen de bombeo de 24 horas, mientras los pozos comunales operan con menor caudal, a razón de 3 hasta 8.5 m³/h, donde el menor valor corresponde al acuífero fracturado aprovechado en la localidad El Guásimo.

De acuerdo al registro de niveles estáticos y dinámicos obtenidos en los pozos de ENACAL, el régimen de bombeo rige al acuífero de 3.5 a 4 m en el sector de Yugo Quebrado, hacia el noreste con dirección a El Sauce tiende a ser mayor los descensos, alcanzando los 12 a 13.5 m de descenso.

4.4.8 Hidrodinámica del acuífero El Sauce

La distribución espacial de profundidad de agua y superficie freática representada en mapas, corresponden a las condiciones anuales del 2017.

Por otra parte, se valoró la fluctuación interanual y estacional en el acuífero, la primera se valoró en el acuífero poroso, esta se obtuvo comparando el promedio interanual de los años 2013 y 2017. En cambio, para el régimen estacional de los niveles de agua se consideró los registros de niveles obtenidos en abril y mayo de 2017, evaluando tanto al acuífero poroso como el fracturado.

4.4.8.1 Profundidad del agua subterránea

La profundidad mínima y máxima de las aguas subterráneas en el acuífero libre oscila entre 0.80 a 16.2 m, registradas en las comunidades de Sabana Grande No. 1 y Santa Bárbara. La profundidad media en el acuífero poroso está representada por la isoprofundidad de 8 m, siendo el valor medio de 7.16 m, (figura 36).

En la localidad de Sabana Grande No. 1 y No. 2, al sureste de la cuenca, se emplaza un área acuífera local y aislada donde las aguas subterráneas son someras, presentando profundidades de 0.8 – 3.6 m.

Las comunidades de San Nicolás – Los Tololos situadas en la parte alta del sistema que conforma al valle, en el sector sureste de la cuenca; en esta zona la profundidad

del agua subterránea oscila entre 5.3 – 6.4 m. Asimismo, la zona sur y suroeste del acuífero libre, en las localidades de Armenia, Llano de Santa Bárbara y el poblado Agua Fría, el agua se encuentra entre 3.6 a 6.4 m.

En el entorno del poblado de Quebrada Seca, las localidades de La Provincia, Llano Palma de Lora, que están ubicados en la parte central del valle; la profundidad del agua subterránea oscila de 3.4 a 11.1 m, aumentando al sureste y disminuyendo en el sector noroeste de zonas de descargas.

En el entorno oeste del valle sobresale la estructura cónica, cerro Santa Bárbara, donde se registra localmente la mayor profundidad de agua en el acuífero poroso, siendo esta 16.16 m.

Las profundidades del agua subterránea en el entorno de la ciudad El Sauce y los poblados El Salitre y Los Limones varían de 5.4 a 10.4 m con respecto al nivel del suelo. En cambio, la zona norte y noroeste del valle en los poblados de La Palma, La Esperanza, se hallan a los 12.8 y 15.2 m, siendo este el sector de mayor distribución espacial, donde las aguas subterráneas no son someras.

Igualmente, las mayores profundidades del agua a nivel local, están en zonas adyacentes al acuífero poroso que sobreyace a los sedimentos de poco espesor, (menor a 7 m), se registraron en el sector entre San José - Sabana Grande, La Ceiba con magnitudes mayores a los 16 m. No obstante, en El Guacucal, ubicada en el sector sureste de la cuenca, podría alcanzar hasta más de 20 m.

En cambio, entre Hato Nuevo y La Herradura, localizados en zona de descarga la oscilación de la profundidad del agua es de 4.5 a 7.0 m.

Por otro lado, las profundidades del agua en el acuífero fracturado se presentan entre los 3.7 a 7.5 m, como valores puntuales, en el sector norte de la cuenca entre poblados Las Pilas y Río Grande, y en el sector noreste con comunidades de El Panamá y Correviento varían de 2.9 y 3.1 m.

En comunidad Los Guásimos, El Almendro y entorno de Cerro Grande, las profundidades del agua son de 2.1 a 7.9 m, siendo en Los Guásimos la menor profundidad del agua subterránea en el acuífero fracturado.

La mayor profundidad del agua subterránea registrada en el acuífero fracturado se encontró en la localidad de El Papalón con 13 m, en cambio, en Los Encuentros, sector que corresponde a la desembocadura del río El Portillo la profundidad del agua se encuentra entre 3.1 a 7.5 m. En los sectores ante descrito el acuífero fracturado está constituido por rocas intrusivas ácidas granodioritas.

En general la oscilación de la profundidad del agua subterránea en el interior del valle responde a las diferentes elevaciones del terreno.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

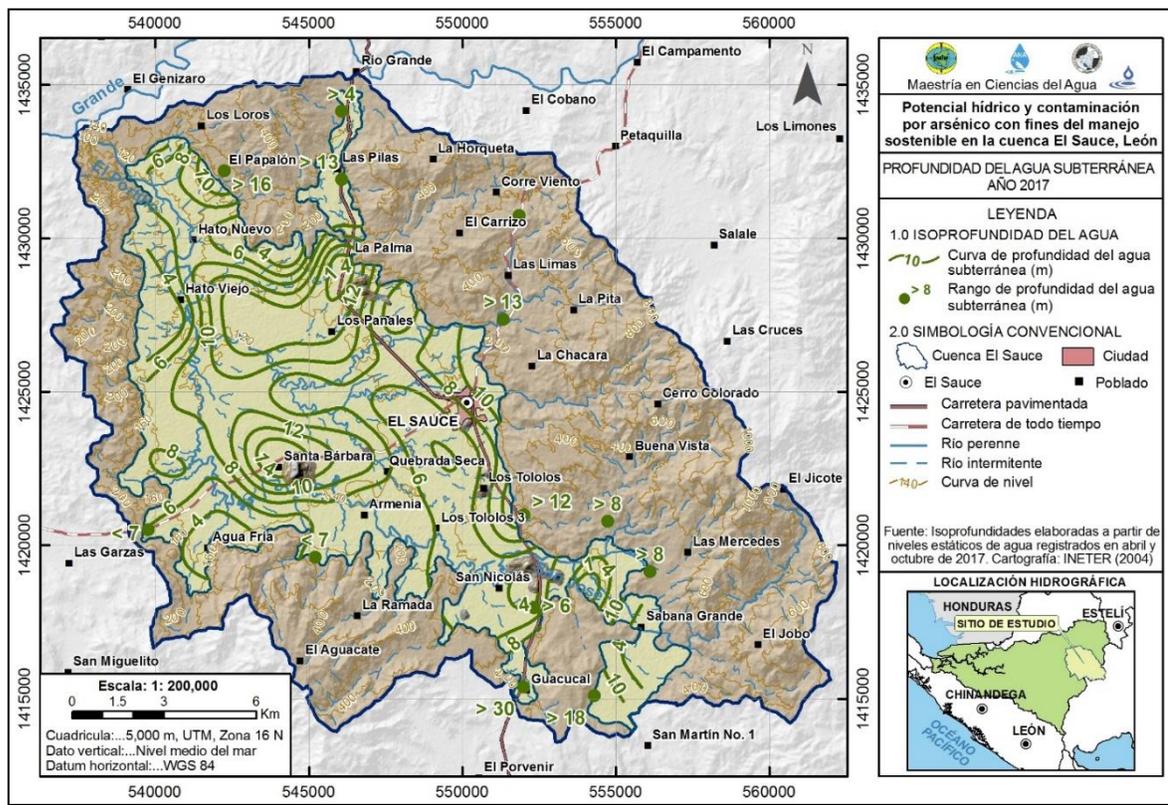


Figura 36. Mapa de profundidad del agua subterránea en la cuenca El Sauce

4.4.8.2 Fluctuación interanual

Se evaluó a través de la media anual obtenida para los años 2013 y 2017, con el fin de determinar la evolución en el tiempo, para ello se consideró los pozos que se ubican en el interior del valle, no obstante, pozos ubicados en zonas adyacentes al acuífero fracturado, no fueron objetos de evaluación en este análisis.

Dentro del análisis se evaluaron 24 pozos, de estos siete son pozo perforado (PP), 2 piezómetro (PZ) y el resto pozos excavados (PE), de acuerdo a gráfico 19, se observa que la evolución de niveles de aguas subterráneas en el acuífero poroso presenta rebajamientos, determinando un valor medio de 0.53 m de **descenso** y que en ninguno de los sitios evaluados se determinó **ascenso**.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

El menor descenso se obtuvo en el PP14, de la comunidad San Nicolás, de 0.33 m, mientras el mayor rebajamiento se registró en el PP12, en Los Tololos, con un descenso de 0.75 m; ambos pozos son comunales abasteciendo a la población del entorno, la diferencia entre estos, es que el segundo pozo es sometido a mayores extracciones de agua.

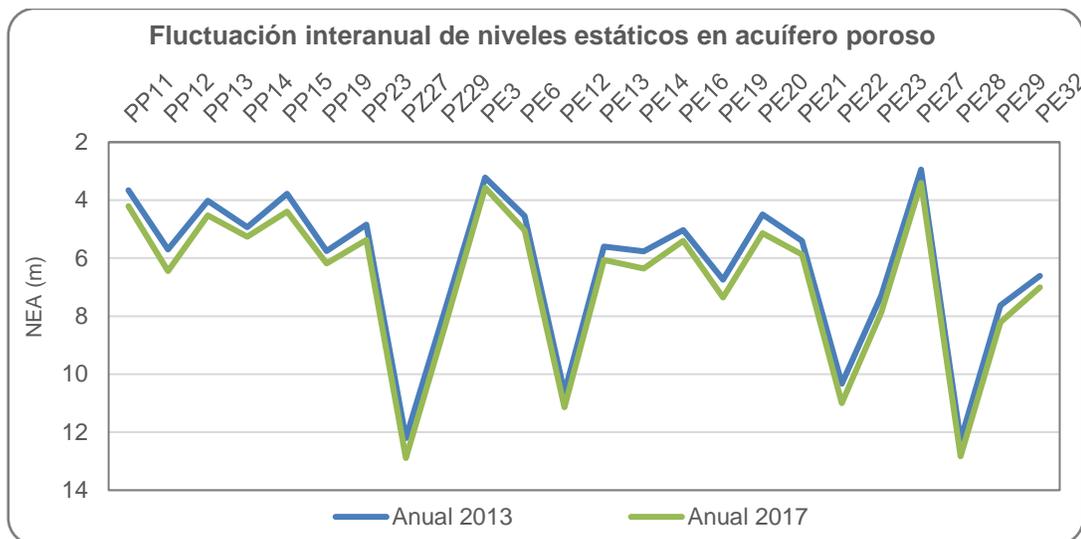


Gráfico 19. Fluctuación interanual de niveles de agua en el acuífero poroso, 2013 y 2017

Los descensos del acuífero en parte son producto de la disminución de las precipitaciones en la cuenca. De acuerdo al registro anual de lluvia, los tres años que anteceden al 2017 presentaron magnitudes inferiores al promedio anual de la cuenca (1,804.28 mm), debido a que el 2015 correspondió a un año Niño.

Mientras que, los tres últimos años que anteceden al 2013, la precipitación anual se encontró por encima del promedio anual de las precipitaciones de la cuenca, donde los años 2010 y 2011 corresponden a años con fenómeno Niña, relacionadas a la mayor pluviometría en la cuenca del periodo analizado (2004 – 2018).

Por otra parte, los descensos, también corresponden al aumento de la demanda de agua de la población y a la reducción de la infiltración de las aguas en el suelo, debido a que gran parte de zonas de recarga no cuentan con áreas de reforestación densa y extensas.

Cabe destacar, que los niveles registrados por INETER (2008), no fueron objeto de análisis, debido a que fueron obtenidos en diciembre de 2005, no siendo representativo para los meses de abril y octubre, ya que estos representan las salidas de las épocas del año (seca y lluviosa).

4.4.8.3 Fluctuación estacional

Fue evaluada a partir de las mediciones realizadas en abril y octubre de 2017, con el objetivo de determinar el efecto hidráulico del acuífero ante la variación de los niveles a causa del periodo seco y lluvioso, dicho análisis se efectuó para los pozos que se ubican en el acuífero poroso y el acuífero fracturado, pozos ubicados cerca de quebradas, no fueron considerados en el análisis, ya que estos durante el periodo lluvioso tiende a presentar mayor ascenso, los cuales no son representativos para dicho análisis.

Para el análisis del acuífero poroso se consideró veintidós pozos, de estos 7 perforados, 2 piezómetros y 13 pozos excavados, (gráfico 20).

El acuífero poroso ante el efecto hidráulico producido por las precipitaciones presenta un ascenso promedio en los niveles de 2.63 m, registrando el menor ascenso de 0.51 m en el PE21, en la localidad de Las Provincias, hacia la parte central del valle; donde la permeabilidad de los sedimentos del cuaternario podría favorecer a la poca fluctuación de los niveles.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

El mayor ascenso fue de 5.86 m, obtenido del PP23, en el sector de Los Limones; la respuesta hidráulica de este sitio obedece a los estratos más profundos, compuestas por las rocas del terciario, las que afloran a 970 m al noreste del sitio.



Gráfico 20. Fluctuación estacional de los niveles de agua en el acuífero poroso, año 2017

Para la valoración del acuífero fracturado se empleó el registro de 13 pozos, de estos tres perforados y los demás excavados. La fluctuación promedio de los niveles de agua fue de 3.57 m, difiriendo aproximadamente 0.90 m más con respecto a la obtenida para el acuífero poroso.

Los valores mínimos y máximos son 1.68 y 5.15 m, correspondientes a los pozos PE37 y PP10, en las localidades Los Encuentros y El Almendro, respectivamente, (gráfico 21). De acuerdo a lo ubicación de estos sitios, el primero, está en zona de descarga dentro del medio hidrogeológico formado por las rocas del intrusivo ácido granodiorítico, mientras el otro, en la zona de recarga, representado por las rocas andesíticas del Grupo Coyol Inferior.

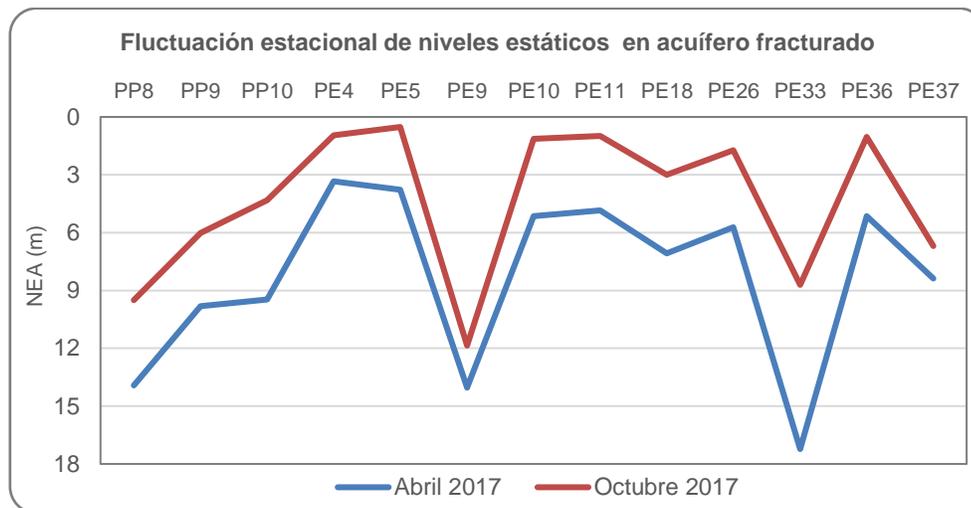


Gráfico 21. Fluctuación estacional de los niveles de agua en el acuífero fracturado, año 2017

Las fluctuaciones de los niveles de las aguas en los alrededores del área de estudio tienen carácter estacional, es decir, que existe una respuesta natural de ascenso o descenso según la época lluviosa o seca, respectivamente.

4.4.8.4 Piezometría

Las isofreáticas en el valle de El Sauce oscilan desde los 180 msnm determinada entre las localidades de San Nicolás y El Guacucal, en el sector sureste de la cuenca, descendiendo hasta los 110 msnm en La Herradura, situada al noroeste en zona de descarga.

La zona de mayor carga freática se ubica en el Llano de Sabana Grande, desde los 225 – 215 msnm, esta corresponde a un área acuífera aislada, es alimentada por los flujos procedentes del medio fracturado del entorno del llano. No obstante, después que los flujos recorren el llano con orientación de sur a norte, estos flujos se reorientan hacia al noroeste, ingresando hacia las localidades de San José, donde estos, tienden a concentrarse en una sección aproximada de 500 m poco

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

permeable, ya que la misma está delimitada por estribaciones geológicas del terciario, que dan origen a una boquilla, drenando los flujos paralelos al curso del río principal (río San José en la parte alta de la cuenca).

La zona urbana este de El Sauce presenta isofreáticas de 170 msnm, escurriendo con orientación noroeste hasta descender a los 120 msnm en el entorno este de la localidad Llano Palma de Lora.

El entorno sur del poblado Las Pilas está representado por la isofreática de 180 msnm, descendiendo con dirección sur hasta los 160 msnm en La Palma, escurriendo posteriormente con orientación suroeste – oeste, hasta descender a los 120 msnm en la localidad de La Laguneta.

Las isofreáticas en los poblados Agua Fría, presentan carga de 150 msnm, escurriendo con dirección norte hacia la localidad Tres Puertas, descendiendo a los 150 msnm. En cambio, en la localidad de Llano Palma de Lora presenta carga freática inferior a los 120 msnm escurriendo con dirección norte - noroeste hacia la localidad La Casa del Cinco.

En el poblado Los Loros, se presentan isofreáticas desde los 140 msnm descargando con dirección suroeste para finalmente integrarse al curso del río El Portillo, que presenta carga freática inferior a los 110 msnm.

La distribución espacial de las curvas isofreáticas no refleja alteración en la dinámica de las aguas subterráneas a causa del aprovechamiento extensivo. En las partes altas del acuífero poroso, es decir, zonas adyacentes al acuífero fracturado, el agua se escurre a mayor velocidad, presentando gradientes desde 0.006 – 0.025 en la zona intermedia, disminuyen a 0.003 – 0.005 en la zona baja y de pendiente plana,

los flujos de aguas se transportan con velocidades menores, presentado gradiente desde 0.002 – 0.004.

Para el acuífero fracturado se presentó rangos de niveles freáticos, estos oscilan desde los 180 a los 220 msnm entre los poblados Las pilas y Río Grande, mientras en el sector noreste de la cuenca en las localidades de El Panamá y Correviento, varían de los 402 a los 460 msnm, presentados en esta zona el valor máximo determinado en el área de estudio.

Al suroeste de la cuenca, en las localidades de El Almendro, Los Guásimos y en el entorno de Cerro Grande se encuentran desde los 225 msnm hasta los 260 msnm, al suroeste en el poblado Agua Frías con 163 msnm hasta los 170 msnm, en el sector noroeste desde Los Loros a Los Encuentros, las cargas freáticas oscilan desde de los 161 msnm a 100 msnm, este último se ubica en la confluencia del río El Portillo con el río Grande, siendo la zona más baja de la cuenca.

4.4.8.5 Dirección de flujos

El movimiento de las aguas subterráneas en el interior del valle se rige por la topografía, las características del valle que son propia de una caldera volcánica, dan origen a distintas direcciones de flujo de agua, los que convergen en la zona baja del valle.

De acuerdo a la figura 37, se presentan la convergencia de tres flujos de agua predominante, el primero, procede del norte - noreste con dirección al curso del río principal (río El Portillo) y es de mayor aporte en la zona; el segundo, escurre del sureste proveniente de la zona alta en dirección paralela al río principal y el tercero, que se deriva de la dirección suroeste drenando siempre al río principal.

Los distintos flujos convergen en las partes bajas del acuífero entre las localidades de Llanos Palma de Lora, Hato Viejo y La Laguneta, orientándose con dirección norte en la localidad Hato Nuevo y finalmente descargando en dirección noroeste.

La zona de mayor aprovechamiento, situada en el sector de Quebrada Seca, no indica afectación de la dirección del flujo, por inducción de bombeo intensivo de los pozos de ENACAL, sin embargo, no se descarta que el bombeo produzca cambios de dirección de la condición natural de forma puntual, (figura 37).

En la zona de descarga situada entre las localidades de La Herradura y Los Encuentros, los flujos de aguas se mueven sobre un medio fracturado compuesto de rocas granodioritas.

En la parte baja de la cuenca se concentran los flujos subterráneos para descargar hacia otro sistema, no obstante, por la baja permeabilidad y grado de meteorización que presentan las rocas granodioritas, la zona actúa como barrera, dando origen a un acuífero de las aguas subterráneas, donde la mayor parte se descarga como agua superficial a través del curso del río principal, el que presenta caudal base en los meses de abril de los dos años registrado.

Los flujos que proceden del acuífero poroso e ingresan a esta zona, descargan a través de una sección aproximada de 800 m compuesta siempre de rocas granodioritas.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

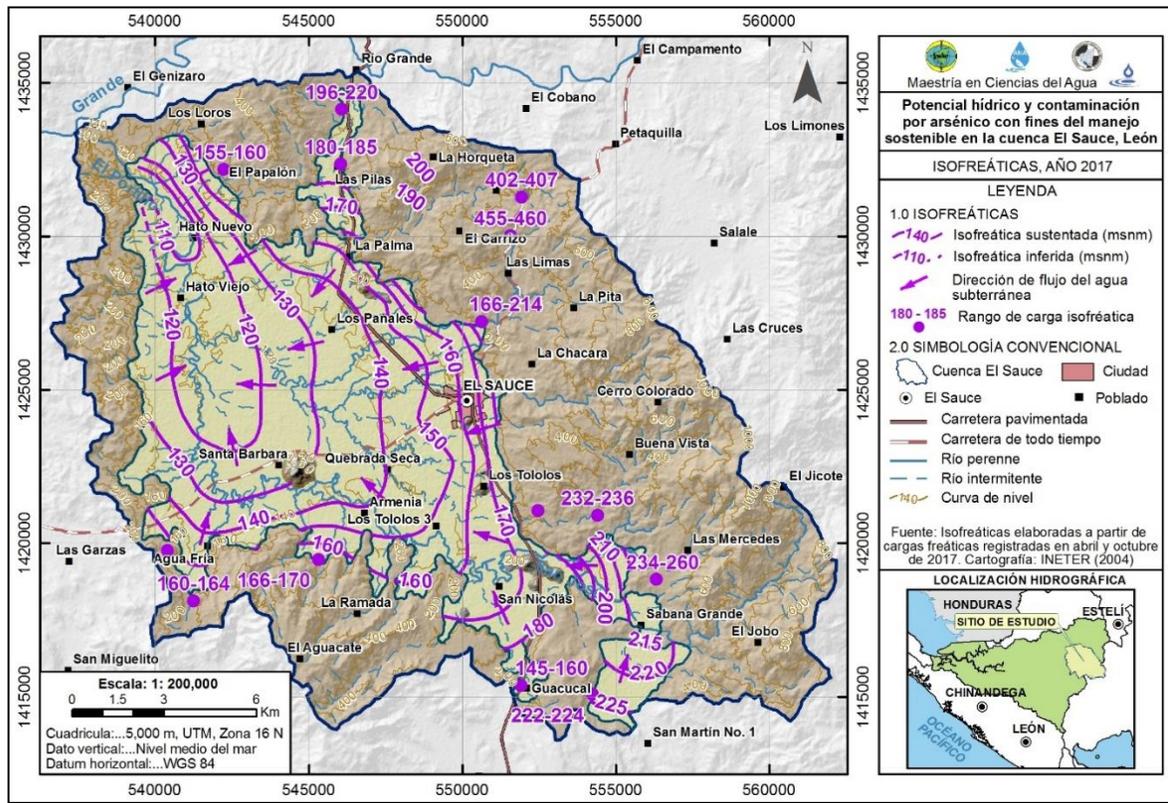


Figura 37. Mapa de isofreáticas en la cuenca El Sauce

4.4.9 Esgurrimiento subterráneo

La valoración del escurrimiento subterráneo se efectuó en la zona de descarga del acuífero poroso valorando una sección de 3,400 m con orientación noreste - suroeste, que atraviesa a la localidad de Hato Nuevo, dicha sección representa la salida de agua de los flujos procedentes de la zona media y alta. Según INETER (2008), los espesores permeables obtenidos por levantamiento geofísico para esa zona son inferiores a los 30 m, reduciendo la potencia a medida que se extiende al noroeste.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

La geomorfología de la cuenca da origen a una caldera volcánica, la cual concentra los flujos de aguas subterráneas procedentes de la zona alta hacia la zona baja, para finalmente descargar los flujos a través de una sección ya referida.

Los aspectos antes descritos, permitieron determinar el escurrimiento, estableciendo un valor de transmisividad de 100 m²/d correspondiente al acuífero poroso, con gradiente de 0.003, obtenido a partir de las dinámicas de las aguas de zonas adyacente a esta, y con ancho de sección de 3,400 m, que representa la sección de descarga de la parte baja de la cuenca, obteniendo un volumen anual de descarga de 0.37 Mm³/a. En la tabla 22 se presentan la estimación del volumen de descarga subterránea.

Tabla 22. Escurrimiento subterráneo anual de salida en la cuenca El Sauce

Localización	T (m ² /d)	i	L (m)	Q _{Subt.S} (m ³ /d)	Q _{Subt. s} (Mm ³ /a)
Hato Nuevo	100	0.003	3,400	1,020	0.37

4.4.10 Aprovechamiento del recurso

Las aguas subterráneas de la cuenca son aprovechadas principalmente para el uso potable, doméstico, ganadería y con menor demanda para las actividades agrícolas.

4.4.10.1 Consumo humano de agua

Fue cuantificado considerando las extracciones a través de pozos de bombeo y los volúmenes de aprovechamiento de la población dispersa que no está conectada a una red de abastecimiento.

Consumo agua a través de pozos

La extracción de agua potable estimada en la cuenca fue de 1.11 Mm³/a, (gráfico 22), esta es extraída a través de 11 pozos perforados, de estos cuatro son de ENACAL y siete comunales establecidos como mini acueducto por bombeo eléctrico (MABE), la extracción de los pozos de ENACAL representa el 90.10% del volumen extraído anualmente por bombeo, (anexo 8.1).

Los pozos de ENACAL abastecen a la población de El Sauce, estos en promedio extraen 712 m³/d, cuentan con procesos de potabilización (desinfección) en cambio, los MABE, no todos cuentan con dicho proceso.

Los MABE corresponden a CAPS, distribuidos en las siguientes localidades: El Guacucal, San José – San Ramón, Sabana Grande No. 1, El Guásimo, El Pilon, Las Pilas y La Laguneta, mientras los pozos de ENACAL ubicados en los sectores de Quebrada Seca y Arlen Siu.

Consumo agua de la población dispersa

Tanto en el interior del valle como en las áreas acuíferas fracturadas (parte alta de la cuenca) se encuentran comunidades dispersas que no están conectadas a una red de distribución, pero que cuentan con proyectos de abastecimientos de agua para la comunidad por medio de Comités de Agua Potable y Saneamiento (CAPS) y en otros casos provisto de pozos privados de uso familiar.

Para la cuantificación de los volúmenes de agua aprovechada por las comunidades dispersa se recurrió a los datos de población del censo nacional de población de la alcaldía El Sauce proyectado al 2018, empleando la dotación que establecen las normas de INAA (2001), 75 lppd para poblaciones menores a los 5000 habitantes.

Las comunidades que cuentan con una red de distribución de agua a través de MABE o por mini acueducto por gravedad (MAG), se consideró un 20% de la población; en el caso de los MABE no siempre toda la población está conectada a la red de distribución, debido a que hay que asumir costos por el servicio, y en los MAG por problemas de ubicación, asociado a la diferencia de elevaciones.

El volumen de agua subterránea anual requerida por la población dispersa que se distribuye en el interior de la cuenca es de 0.25 Mm³/a, entre las comarcas con mayor aprovechamiento del recurso se encuentran Los Panales, Los Tololos y La Palma, con 0.069, 0.034 y 0.030 Mm³/a, respectivamente, (anexo 8.2).

Abastecimiento de agua a través de mini acueducto por gravedad

El medio fracturado que prevalece en la parte alta de la cuenca contribuye a la descarga de aguas subterráneas en forma de manantiales. Gran parte de estos son aprovechados por las comunidades del entorno, estableciendo mini acueductos por gravedad.

No obstante, las comunidades asentadas en la parte alta de la cuenca están expuestas a desafiar déficit de agua, debido a que el medio geológico no contribuye con el almacenamiento de las aguas, en ciertos casos los sitios aprovechados satisfacen con dificultad las necesidades de la comunidad en el periodo seco, en otros casos no logran suplir la demanda de agua de toda la comunidad, por lo que recurren a otras fuentes alterna, las que no siempre están disponible en el entorno.

A través de la Unidad Municipal de Agua y Saneamiento (UMAS – Alcaldía El Sauce), fue posible obtener el registro de los distintos mini acueducto por gravedad que suplen a las comunidades ubicadas en las partes altas, dicho registro actualizado al 2018.

A través del registro se determinó las aportaciones anuales de procedentes de la captación de manantiales, obteniendo un volumen anual de 0.28 Mm³/a, obtenido de 12 puntos de aprovechamiento, los caudales de estos oscilan desde 1.36 – 5.90 m³/h, con un promedio de 2.64 m³/h, permaneciendo habilitado tanto en el periodo lluvioso como en el seco.

De la aportación obtenida en las captaciones se consideró el 60% del volumen cuantificado, como volumen aprovechado por la comunidad, debido a que estos presentan descarga las 24 horas, y una vez que las unidades de almacenamiento alcanzan su capacidad, descargan a través de las salidas de rebose, generando flujos superficiales que se integran a la red de drenaje.

Para efecto de la integración del balance se consideró el 60% del volumen captado en los manantiales, como el volumen aprovechado por las comunidades a través de manantiales, obteniendo 0.17 Mm³/a y 0.11 Mm³/a que representa el 40% del volumen total procedentes de la descarga de manantiales, los que se integran a la red de drenaje, y para efecto de la integración del balance, se consideró como un volumen procedente de aguas superficiales.

De acuerdo a la distribución de los MAG, se concentran tanto al norte, este y sureste de El Sauce y tan solo uno al suroeste, ubicándose en las comunidades de San Gayetano, Las Cañas, Las Limas, Corre Vientos, Cerro Colorado, El Guayabo, Buena Vista, El Borbollón, El Palmar y Aguas Frías, entre estos sobre sale la captación realizada en El Borbollón, siendo la de mayor caudal.

En el gráfico 22, se presenta el volumen total de agua requerido para consumo humano, siendo este de 1.53 Mm³/a, donde el consumo de agua proveniente de los pozos de bombeo (ENACAL y MABE) representan el 72.55% de los volúmenes de agua requerido para consumo humano.

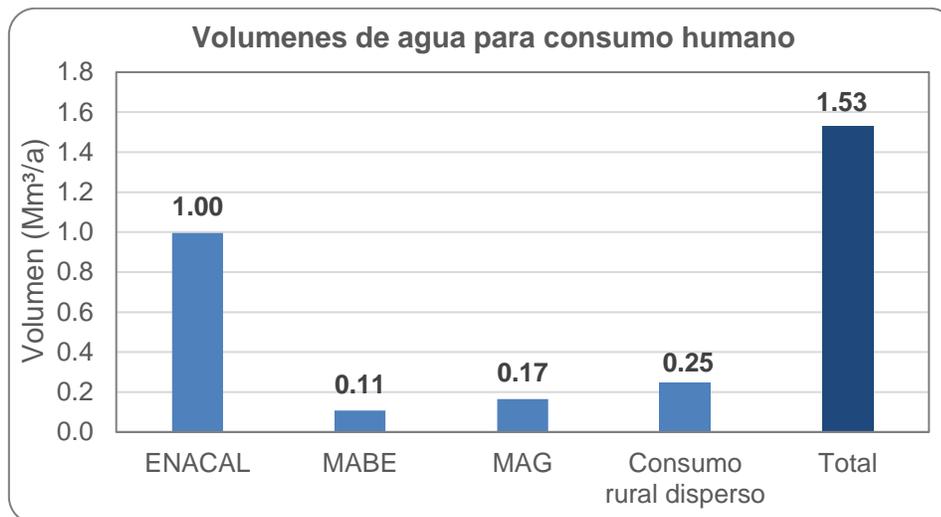


Gráfico 22. Volumen anual de agua para consumo humano

4.4.10.2 Consumo de agua actividad pecuaria

La ganadería es la tercera actividad que demanda mayor consumo de agua, especialmente en el periodo seco, dado que en el periodo lluvioso el ganado se abastece de aguas superficiales. El volumen agua subterránea requerido para esta actividad es de 0.15 Mm³/a, mientras en aguas superficiales 0.09 Mm³/a, (anexo 8.4).

Las comarcas con mayor presencia de ganado en la cuenca son Los Panales, Los Tololos y Los Loros, demandando anualmente consumo de agua subterránea de 0.032, 0.019 y 0.015 Mm³/a, respectivamente.

4.4.10.3 Consumo de agua actividad agrícola

El uso del agua a través de riego en la zona del valle, representa la segunda actividad con mayor extracción de agua subterránea con 0.93 Mm³/a. Se empleó lámina de riego de 6 mm, asociándola al cultivo permanente de mayor producción

en la zona (musáceas), dicha lámina de agua, fue determinada con base con base a INTA & MEFCCA (2019), (anexo 8.5).

No obstante, debido a que se desconocen las hectáreas irrigadas del cultivo permanente de mayor producción en la cuenca, los que requieren de riego en época seca y lluviosa para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo, la lámina de agua considerada es menor a las necesidades de agua de este (musáceas).

4.4.10.4 Consumo de agua total en la cuenca

El consumo de agua requerido para las actividades que se desarrollan en la cuenca es de 2.61 Mm³/a, donde el agua aprovechada para consumo humano representa el 58.62% del volumen anual total, (gráfico 23).

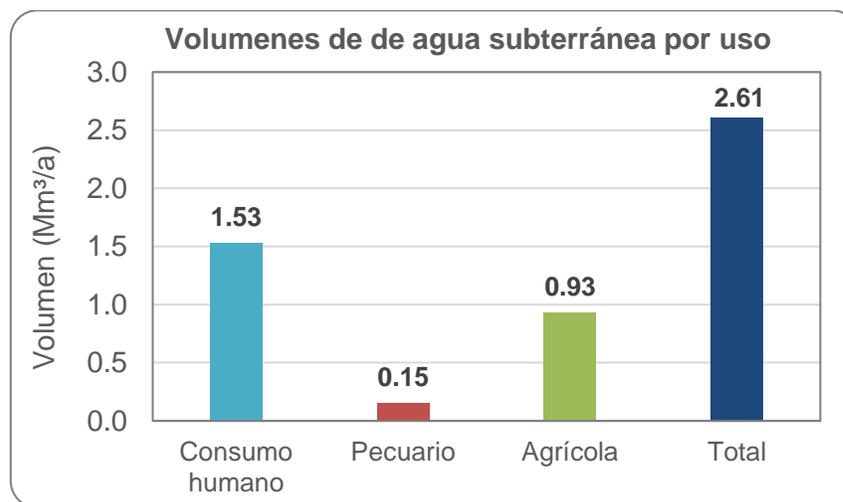


Gráfico 23. Volúmenes anuales de agua subterránea según los usos.

4.5 Balance hidrogeológico

Al realizar el balance hidrogeológico se contemplaron las entradas y salidas del sistema, considerando como variables de entradas: recarga natural (R), recarga de aguas superficiales (R_{AS}) y recarga por retorno (R_r).

En cambio, las salidas están representada por: extracciones de agua en pozos (E_{Pozos}), aprovechamiento de agua a través de manantiales (A_{Mn}), escurrimiento subterráneo ($Q_{Subt.S}$) y flujo base de la cuenca ($Q_{Sup.S}$).

Las variables obtenidas en el desarrollo del estudio, corresponden a información actualizada al 2018, no obstante, la cuenca en estudio posee datos de otras investigaciones con algunas variables consideradas en la estructura del balance.

4.5.1 Entradas al sistema

- a) Infiltración directa de la precipitación a través del terreno (R)

El valor de la recarga por infiltración directa a través del terreno es de 121.98 Mm^3/a , como resultado de la determinación de la recarga potencial estimadas a partir de la distribución de 16 pruebas de infiltración, así mismo teniendo en cuenta la cobertura, pendientes del terreno y las variables climatológicas periodo 2004 - 2018.

No obstante, INETER (2008), determinó una recarga de 74 Mm^3/a para la cuenca de estudio, difiriendo aproximadamente en un 60% de la recarga obtenida en el estudio, la diferencia de estas, podría deberse al periodo seleccionado de las variables climáticas, así mismo, a los valores de coeficientes de infiltración determinados a partir de las pruebas de infiltración y el modelo analítico del balance hídrico de suelo considerado.

b) Recarga por aguas superficiales (R_{AS})

Procedentes de la descarga de aguas de manantiales ubicadas en la parte de la cuenca, que escurren a través de la red de drenaje, las que posteriormente termina integrando al sistema acuífero. De este se obtuvo 0.11 Mm³/a. Cabe destacar que el volumen determinado únicamente representa volúmenes de agua procedentes de manantiales registrado en el estudio.

c) Recarga por Retorno (R_r)

De acuerdo a la extracción realizada en inventario de campo se logró determinar recarga por retorno de pérdidas en el sistema de la red de agua potable, así mismo la recarga por retorno de riego, determinando, que la recarga por retorno fue de 0.50 Mm³/a, donde el volumen de retorno por riego representa el 56% de la recarga por retorno total.

En el estudio INETER (2008), la recarga por retorno fue considerada insignificante, debido a que se registraban pocas áreas de riego, en cuanto a la recarga por retorno de fugas en el sistema de agua potable no fue cuantificada.

4.5.2 Salidas del sistema

a) Extracción de agua a través de pozos (E_{Pozos})

Para la cuenca se determinó un volumen de extracción anual en pozos de 2.44 Mm³/a, que corresponde a la suma de los volúmenes de aprovechamiento del recurso extraído para consumo humano a través de pozos (sin considerar el volumen de aprovechamiento a través de manantiales), actividad agrícola y pecuaria, esta última dirigida únicamente a la producción del ganado bovino.

Esta resulta de la diferencia entre el volumen total de aprovechamiento en la cuenca de 2.61 Mm³/ y el volumen aprovechado a través de manantiales.

INETER (2008), determinó un volumen de aprovechamiento total de 1.21 Mm³/a, cuantificando un volumen de agua menor al estimado en el estudio, la diferencia obedece al aumento de la población y de la producción pecuaria y la agrícola, donde la dos últimas demandan mayor consumo de agua en la época seca.

b) Aprovechamiento de agua a través de manantiales (A_{Mn})

Se cuantificó a partir del registro de manantiales que están establecidos como MAG, ubicados en la parte alta de la cuenca, donde la disponibilidad del recurso es limitado, debido a que el medio no contribuye al almacenamiento de las aguas subterráneas, para dicha variable se cuantificó un volumen de 0.17 Mm³/a.

c) Ecurrimiento subterráneo ($Q_{Subt.s}$)

Se estimó a partir del método de Darcy, evaluado únicamente una sección, ubicada en la zona de descarga del acuífero poroso, la que representa salida de agua subterránea a través del límite noroeste del acuífero, de este se obtuvo un valor de 0.37 Mm³/a.

Este parámetro fue estimado por INETER (2008), determinado 21 Mm³/a, un valor mucho mayor al determinado en el estudio, la diferencia entre estos, podría obedecer a la magnitud de transmisividad, y al número de secciones evaluadas.

d) Caudal base ($Q_{Base.S}$)

Debido a las condiciones de la cuenca que delimita un sistema cerrado, compuesto por un medio fracturado en la zona de descarga, el cual contribuye a que la cuenca presente caudal base, y que permanece por la salida de agua subterránea a través del curso del río principal. Para este parámetro se obtuvo un volumen anual de 22.71 Mm³.

e) Pérdida de agua por evapotranspiración real (ETR)

Este parámetro no fue cuantificado, ya que es aplicado cuando la profundidad del agua subterránea se encuentra a menos de 2 metros. La cuenca presenta pocas áreas únicamente en la zona de descarga, considerándose insignificante la afectación de este parámetro.

4.5.3 Variación del almacenamiento (ΔS)

Tomando en cuenta las variables antes descritas, las entradas al sistema, se cuantificaron en 122.59 Mm³/año, en cuanto a las salidas se cuantificaron en 25.69 Mm³/año. Esto indica que existe una disponibilidad bruta de 96.90 Mm³/año, (tabla 23).

Tabla 23. Balance hidrogeológico de la cuenca El Sauce

Parámetro	Volumen (Mm ³ /a)
Entradas o recarga a la unidad hidrológica	
Recarga por infiltración de lluvia (R)	121.98
Recarga de aguas superficiales (R _{AS})	0.11
Recarga por Retorno (R _r)	0.50
Total de Entradas	122.59
Salidas en la unidad hidrológica	
Extracción de agua subterránea a través de pozos (E _{Pozos})	2.44
Aprovechamiento de agua subterránea a través de manantiales (A _{Mn})	0.17
Escorrentamiento Subterráneo (Q _{Subt.S})	0.37
Flujo base del río (Q _{Sup.S})	22.71
Total de Salidas	25.69
Evaluación del Almacenamiento	
Variación del Almacenamiento(ΔS)	96.90

Las salidas en el sistema representan el 21.06% de la recarga por infiltración de lluvia, indicando que la cuenca en la parte media y parte de la baja, cuenta con un potencial de aguas subterráneas, el cual podría ser aprovechado extensivamente, bajo un régimen natural y equilibrado, a fin de no alterar significativamente las condiciones hidrodinámicas e hidráulicas del acuífero.

En cuanto a las extracciones de agua requerida para consumo humano y uso agropecuario representan el 2.0% de la recarga por infiltración de lluvia. Por tanto, puede considerarse que las aguas subterráneas actualmente son aprovechadas extensivamente, prevaleciendo únicamente una zona de bombeo concentrada y local, compuesta por los pozos de ENACAL que aprovechan intensivamente el acuífero en la localidad de Quebrada Seca.

Por otra parte, un volumen excedente determinado para la cuenca, no significa que no existan limitaciones en cuanto a la disponibilidad del recurso, ya que las zonas altas, en el periodo seco son afectadas por el déficit de agua, debido a que esta zona de la cuenca se presentan acuíferos aislados de baja producción, por otra parte, las zonas acuíferas productivas se ubican en el interior del valle.

4.6 Calidad de las aguas

La calidad del agua se determinó con base a resultados fisicoquímicos obtenidos en campo, así como, la contaminación natural por arsénico evaluada en aguas superficiales y subterráneas.

4.6.1 Parámetros fisicoquímicos de campo

Los parámetros físicos de campo fueron registrados en 29 pozos perforados y 26 excavados, la mayoría de estos son comunitarios y en otros casos de uso domiciliar.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Del total de 55 pozos monitoreados en campo, se midieron 49 en la época seca, mientras en la lluviosa 52. En tabla 24, se presentan los valores mínimos, máximos y promedios de los parámetros evaluados.

Tabla 24. Resultados de parámetros fisico-químicos de campo

Parámetro	T (°C)		pH		CE (µS/cm)		SDT (mg/l)		OD (mg/l)		Eh (mV)
	Seca	Lluv.	Seca	Lluv.	Seca	Lluv.	Seca	Lluv.	Seca	Lluv.	
Mínimo	26.7	25.4	6.30	4.72	118.4	115.2	71.2	57.7	2.4	0.6	-769.8
Máximo	33.7	32.9	7.64	6.63	652.0	796.0	327.0	397.0	7.5	4.2	-43.4
Promedio	29.5	28.6	6.81	5.62	290.3	339.9	145.8	169.1	4.3	2.3	-205.8
Mediana	29.6	28.7	6.77	5.60	261.0	310.0	131.0	152.5	4.3	2.3	-163.7
CAPRE	18 - 30		6.5 - 8.5		400		1000		-		-

Lluv.: Lluviosa

Con el fin de analizar el comportamiento de los parámetros evaluados en las dos épocas del año se elaboraron los gráficos y los pozos fueron agrupados por características hidrogeológicas, los que se encuentran en zonas con mayor espesor permeable del acuífero poroso; los situados adyacentes al acuífero fracturado y; los ubicados en el interior del acuífero fracturado.

4.6.1.1 Temperatura

La distribución estacional de este parámetro, en época lluviosa oscila de 25.4 °C y en 33.7 °C en la seca, con un promedio de 29.5 °C; la fluctuación térmica del agua subterránea se registra para el periodo evaluado entre $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

De acuerdo a las norma CAPRE, los pozos por encima del valor recomendado en la época lluviosa son el PP17, PE3, PE32, PP3, PP4, PP7, PP24, PP25, PP26, PE24, PE4, PE33 y PE37. No obstante, en esta época, implican a dos sitios, el PP3,

PP17, con 32.9 y 30.3 °C, este último pertenece a la red de ENACAL y el primero abastece a la comunidad San José y San Ramón, (gráfico 24).

Considerando el criterio de Krásný & Hecht (1998), temperaturas iguales o por encima de 30° C son definidas como aguas termales. Sin embargo, Custodio & Llamas, (1983), expresan que un agua sería considerada termal, cuando exceda la temperatura media anual del lugar más 4° C. Así, partiendo de este criterio, para la cuenca se registró un valor de 27.60° C más 4° C; resultando un valor de 31.60° C; de esta manera, el pozo con aguas hipertermas en el área de estudio está afectado únicamente por el PP3.

El medio hidrogeológico del acuífero de la cuenca, está afectado por fracturamiento geológico intenso, condición que deriva en probable ascensión y circulación de flujos profundos; que provocan termalismo moderado al acuífero local.

Los pozos ubicados en el entorno del PP3 presentan posible afectación termal, entre estos el PP4, PP7, PE3 y PE4, con temperaturas de 30.4, 30.1, 31.5 y 31.3 °C, respectivamente, registradas en época seca. Las profundidades de los pozos perforados oscilan entre 25.60 a 59.70 m, mientras los excavados son de 10.13 y 14.67 m.

De acuerdo al gráfico 24, el grupo de pozo PP2 – PE34, se ubican en zonas adyacentes al acuífero fracturado, en esta se presentan la mayor cantidad con valores de temperatura mayor a los 30 ° C y el pozo afectado por termalismo (PP3), superando los 32°C tanto en épocas seca como lluviosa.

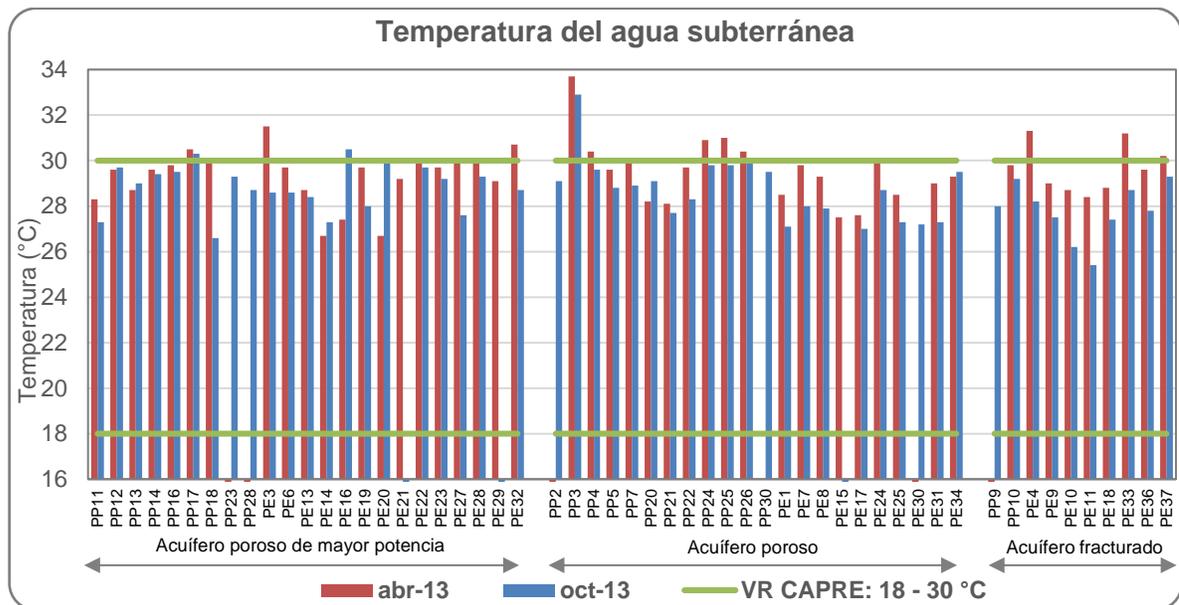


Gráfico 24. Comportamiento de la temperatura en aguas subterráneas, época seca y lluviosa de 2013

4.6.1.2 Potencial de hidrogeno (pH)

El pH en el acuífero oscila de 4.72 a 7.64, registrado en el periodo seco y lluvioso, respectivamente. El pH se presenta desde ligeramente ácido a ligeramente básico, en general. Con un valor promedio de 6.81 en la época seca, mientras en la lluvioso desde ácido a ligeramente ácido, con un promedio de 5.62.

El pH para las aguas dulces según las normas CAPRE (1994), son de rangos de 6.5 y 8.5, calificadas como aptas para el consumo humano, sin embargo, para el periodo lluvioso solos dos sitios tienen magnitudes en el rango recomendado, siendo las fuentes PP23 y PE25, ubicados en las localidades de Los Limones y Puente Ocho, respectivamente, sector norte de la cuenca. En cuanto a los demás sitios presentan una ligera acidificación posiblemente por el lixiviado del humus, lo cual genera valores inferiores al mínimo recomendado por la norma, (gráfico 25).

Los sitios con pH inferiores a 5 corresponden a los pozos PP7 y PP10, con 4.95 y 4.72, el primero ubicado en zonas adyacentes al acuífero fracturado y el segundo en el acuífero fracturado, ambos ubicados en la localidad de El Almendro. Este comportamiento del pH podría atribuirse a la mezcla de agua con aporte mineralógico de rocas terciarias ácidas y la acidez del humus de la cobertura vegetal del área acuífero.

Con respecto al periodo seco, el 76% de los pozos presentan pH dentro del rango establecido por las normas CAPRE; los sitios con pH inferiores a 5, se ubican en las localidades de Armenia, Santa Sara, El Pavón, Los Panales, La Laguneta, Casa del Cinco, El Puertón, El Almendro, El Papalón y Los Encuentros.

El comportamiento de este parámetro hace indicar que en invierno este se acidifica, mientras en verano presenta carácter ligeramente básico. La acidificación podría ser el resultado de la aportación de iones de bicarbonatos (HCO_3) presentes en las lluvias, las que pasan al terreno por infiltración y tiene oportunidad de disolver anhídrido carbónico (CO_2) y ácidos húmicos procedentes de la descomposición de la materia orgánica, y estos a su vez entran en contactos con las rocas del Grupo Coyol Inferior que presenta acides intermedia, creando disolución de la misma al paso de la zona no saturada, adquiriendo el agua subterránea cierto carácter ácido ligeramente dominante.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

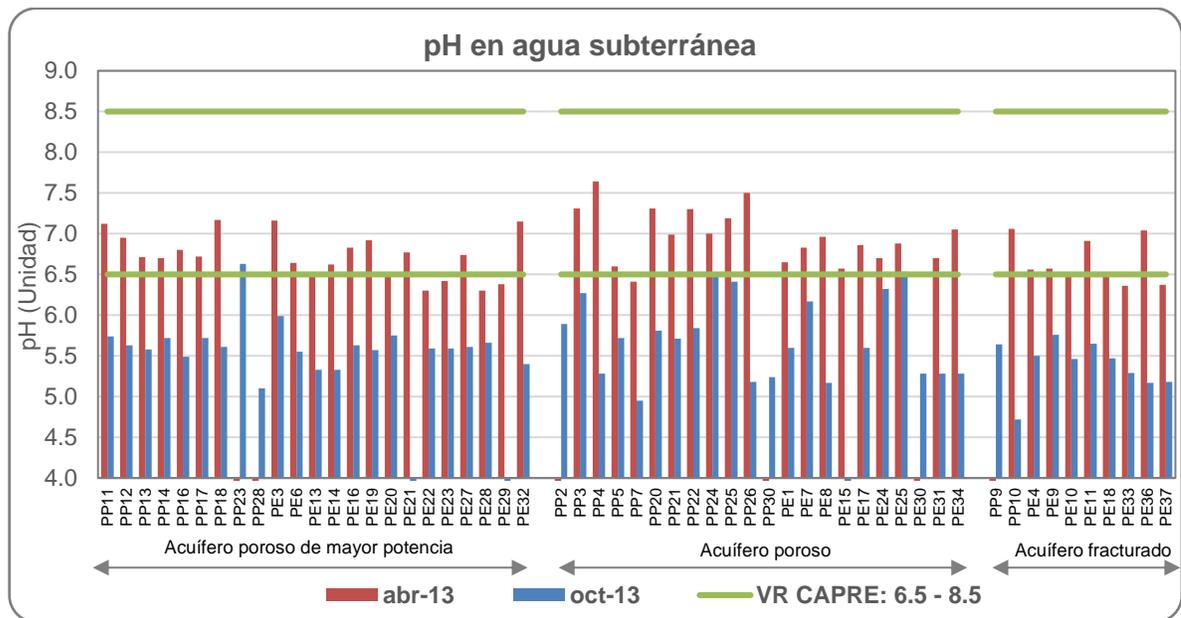


Gráfico 25. Comportamiento del pH en las aguas subterráneas, época seca y lluviosa de 2013

4.6.1.3 Conductividad eléctrica

En el periodo lluvioso se registran los valores mínimo y máximo, con 115.2 a 796 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor promedio de 339.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El comportamiento estacional del parámetro en época seca, varía de 118.4 a 652 $\mu\text{S}/\text{cm}$, obteniéndose un valor medio de 290.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Al comparar los promedios de la estación seca y lluviosa, se puede decir, que el acuífero podría considerarse con una variación moderada de este parámetro, donde la mayoría de sitios, tienden a aumentar las concentraciones de sales en el periodo lluvioso, producto de la matriz hidroquímica inicial de precipitaciones, disolución de minerales de la roca y el aporte del humus generado por la vegetación.

Los sitios que sobrepasan el valor recomendado por las normas de CAPRE (1994), en el periodo seco son los pozos PP14, PE3, PE16, PE19, PP20, PP22, PE1, PE17,

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

y PP10, de estos el PE3 y el PP20, presentan los mayores valores con 651 y 652 $\mu\text{S/cm}$, ubicados en Llano de Sabana Grande y Santa Bárbara, respectivamente, (gráfico 26).

Los pozos que exceden el valor máximo permisible en el periodo seco, aumentan sus conductividades eléctricas en el periodo lluvioso, a excepción de tres pozos el PP14, PE19 y el PE1. Por otra parte, se suman al grupo que sobrepasa el valor recomendado por la norma CAPRE los pozos: PP3, PP21, PE7, PE8 y el PE25.

Las mayores conductividades registradas en el periodo lluvioso corresponden a los pozos, PE3, PE16, PP20 y PE7, con valores de 700 – 796 $\mu\text{S/cm}$, en las localidades de Llano de Sabana Grande, Santa Bárbara y en el entorno norte de la zona urbana de El Sauce. El PE7 corresponde al pozo con mayor variación de dicho parámetro, pasando de 230 $\mu\text{S/cm}$ en el periodo seco a 796 $\mu\text{S/cm}$ en el periodo lluvioso.

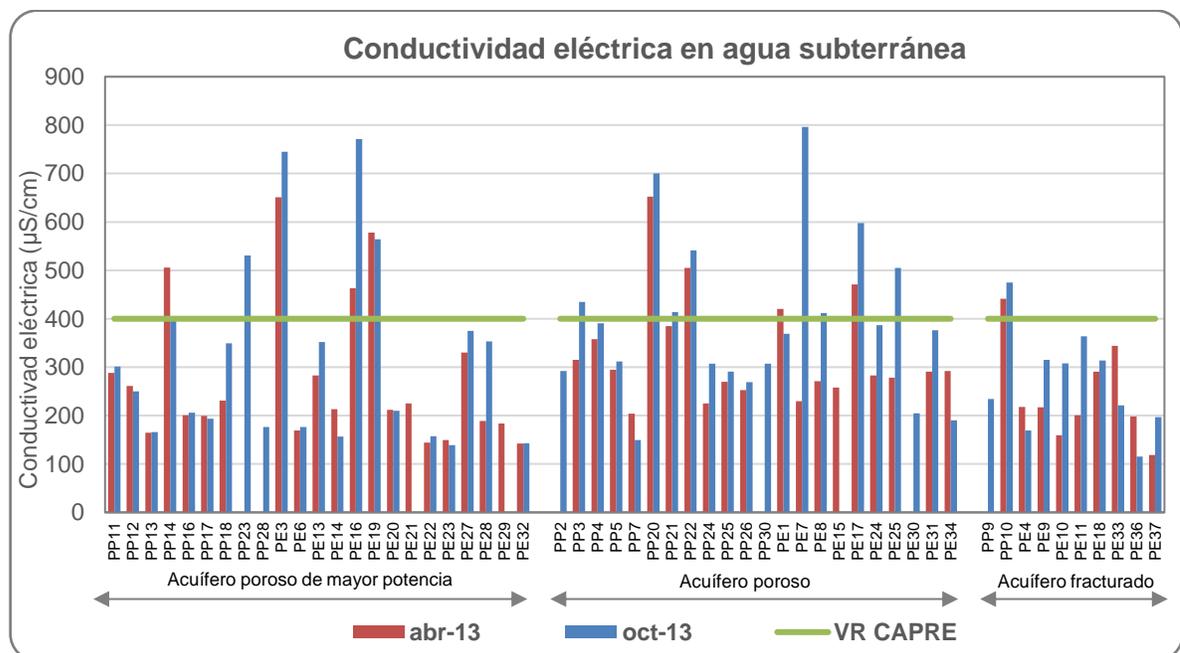


Gráfico 26. Comportamiento de la conductividad eléctrica en aguas subterráneas, época seca y lluviosa de 2013

4.6.1.4 Sólidos totales disueltos

En general, los sólidos totales disueltos en el agua subterránea registrados en campo, indican concentración de materia disuelta, relativamente bajos. Para el área de estudio en la época seca, se registraron concentraciones que varían de 71.2 hasta 327 mg/l, respectivamente, con un valor promedio de 145.8 mg/l. A nivel estacional, en el periodo lluvioso hay aumento, presentando concentraciones que varían de 57.7 a 397 mg/l, con un valor promedio de 169.1 mg/l, (gráfico 27).

La distribución espacial de los valores de concentración de la conductividad eléctrica en el área de estudio presenta el mismo comportamiento espacial, las mayores concentraciones de sólidos totales disueltos, se determinaron en el PE19 y PE7 con 386 y 397 mg/l, respectivamente, registrada en el periodo lluvioso.

De acuerdo a la norma CAPRE (1994), los 55 sitios evaluados presentan concentraciones inferiores al valor máximo admisible de la norma (1,000 mg/l), en ninguno de los casos excediendo los 400 mg/l.

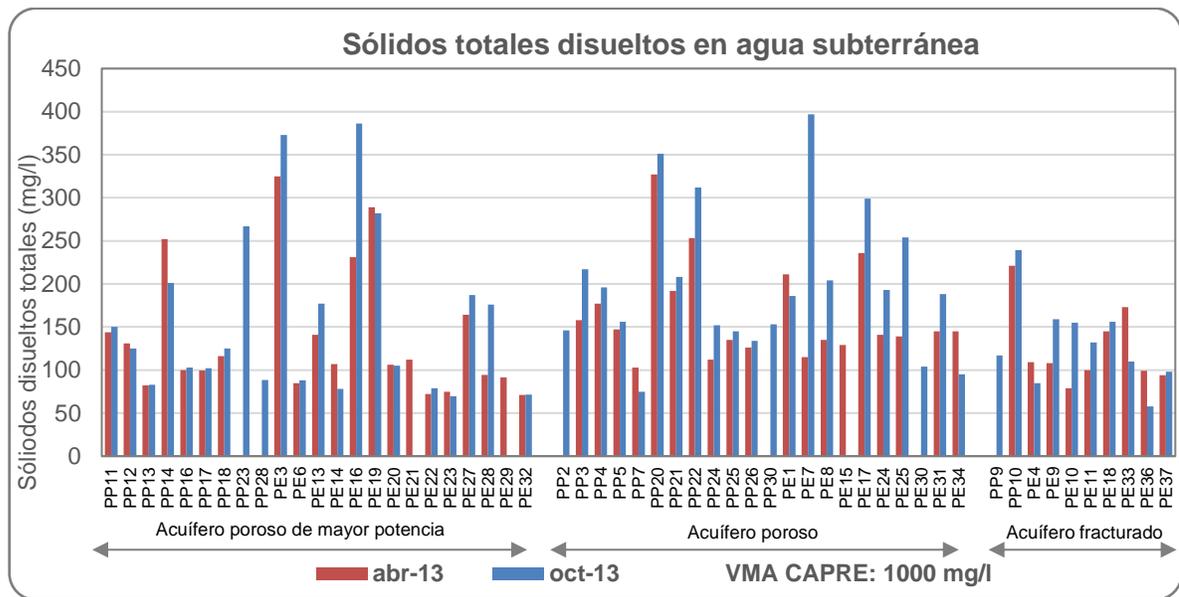


Gráfico 27. Comportamiento de los sólidos totales disueltos en aguas subterráneas, época seca y lluviosa de 2013

4.6.1.5 Oxígeno disuelto

Las concentraciones de oxígeno en la época seca oscilan desde 2.4 a 7.4 mg/l, obteniendo un valor promedio de 4.3 mg/l, mientras en la época lluviosa la mínima y máxima son de 0.6 y 4.2 mg/l, registrando un valor promedio de 4.2 mg/l, (tabla 24).

Las concentraciones de oxígeno aumentan en el periodo seco y disminuyen en el periodo lluvioso, indicando que en época lluviosa hay aumento de sustancias oxidables, tales como materia orgánica, Fe^{2+} , NH_4^+ , NO_2^- , en especial por acción biológica, (Custodio & Llamas, 1983).

Los pozos que presentan las menores concentraciones de oxígeno son el PP4, PP24 y PE1, con concentraciones inferiores a 1 mg/l, presentándose en las localidades de Los Cocos, El Chaparral y Sabana Grande, respectivamente. Dichas

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

concentraciones son indicadores de aguas poca oxigenadas (con probable afectación anóxica), registradas en el periodo lluvioso y obedecen a aguas subterráneas con al alto contenido de materia orgánica.

Las mayores concentraciones de oxígeno disuelto se determinaron en los pozos, PP18, PE32, PP26 y PE31, con concentraciones que oscilan entre los 6.5 a 7.5 mg/l, ubicados en las localidades de Yugo Quebrado, Limón Berbería, Las Pilas y Hato Nuevo, registradas en la época seca, (gráfico 28). Las concentraciones determinadas indican la presencia de aguas muy oxigenadas, un poco atípico, según Custodio & Llamas (1983), los valores típicos de las aguas subterráneas oscilan entre 0 y 5 mg/l, frecuentemente por debajo de 2 mg/l.

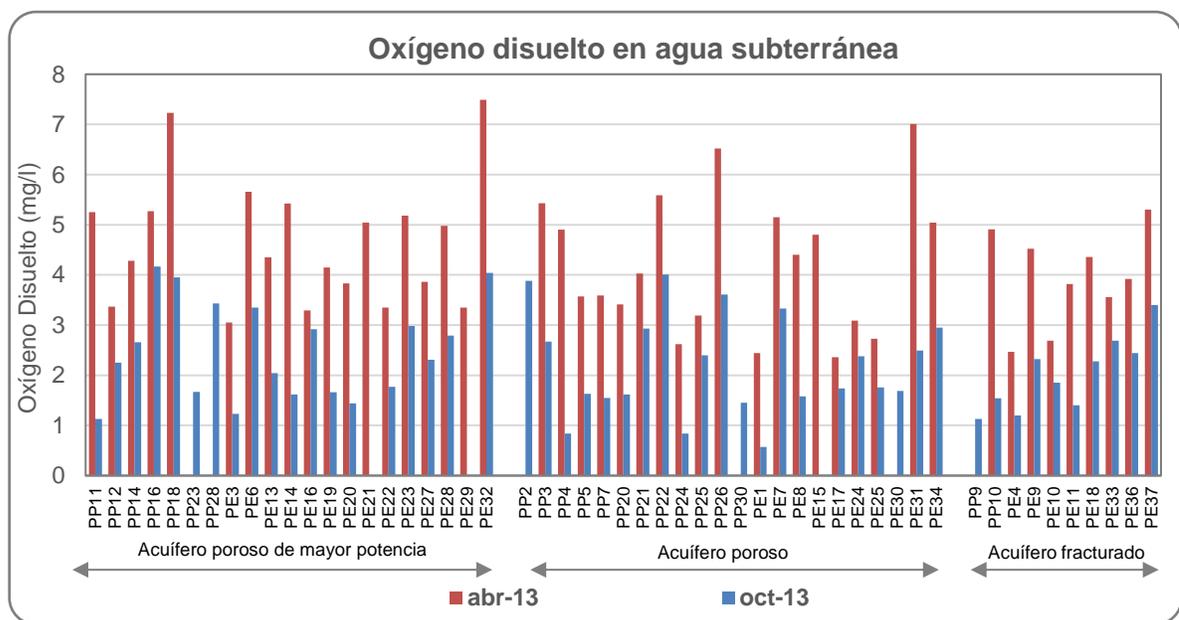


Gráfico 28. Comportamiento del oxígeno disuelto en aguas subterráneas, época seca y lluviosa de 2013

Las concentraciones más bajas de oxígeno determinadas en época lluviosa corresponden a los pozos PP4, PP24 y PE1, con concentraciones inferiores y

4.6.1.6 Potencial redox

Los valores de potencial redox en la cuenca El Sauce, fueron registrados únicamente en la época lluviosa, las concentraciones oscilan entre -43.4 a -769.8 mV, presentando condiciones reductoras. El valor promedio obtenido de 52 pozos registrados fue de -205.8 mV, no obstante, la tendencial central de esta variable está representada por la mediana con -163.7 mV, (tabla 24).

Los menores valores del Eh, se encontró en los pozos PP13, PP14, PP18 y en el PE20, con valores que oscilan entre -662.6 a -769.8 mV, ubicados en la comarca de San Nicolás, y en las localidades Yugo Quebrado y Rancho Lissette, respectivamente, en cambios los sitios que presenta mayores valores corresponden a los pozos PE24 y PE25, con -46.80 y -43.40 m, respectivamente, ambos ubicados en el sector norte de la cuenca en la localidad de Santa María y Puente Ocho, (gráfico 29).

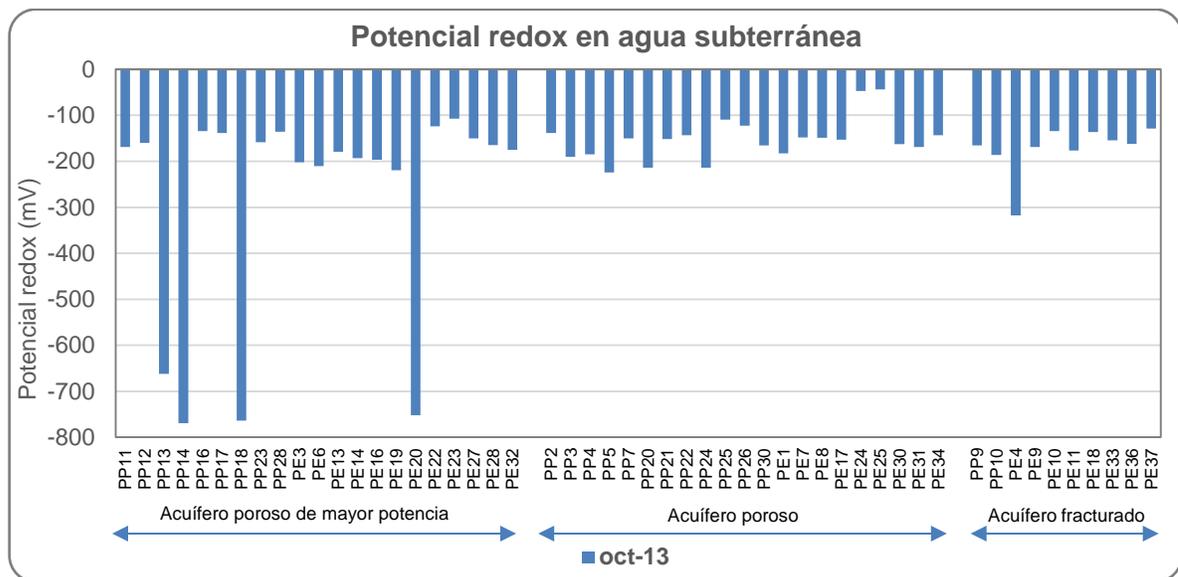


Gráfico 29. Comportamiento del potencial redox en aguas subterráneas, época lluviosa de 2013

El ambiente reductor que prevalece en las aguas subterráneas de la cuenca El Sauce, determinado en época lluviosa, obedece a la presencia de materia orgánica en los sitios registrados, es por ello que en los sitios evaluados prevalecen concentraciones de oxígeno de moderadas a bajas.

Los procesos de oxidación-reducción (redox) pueden modificar la composición del agua, ya sea siendo efectivos en la solubilización, o precipitando ciertos iones que pueden presentarse en varios estados de valencia, (Custodio & Llamas, 1983).

El potencial redox, es importante para controlar el comportamiento de mayores o menores concentración de algunas especies como el arsenito (As III) y arsenato (As V) en aguas subterránea, donde el arsenito es la especiación de mayor toxicidad, (Smedley & Kinniburgh, 2002).

La toxicidad del arsénico se incrementa considerablemente con la reducción de su estado de oxidación de arsenato a arsenito. Estas condiciones son las que han contribuido a los cambios de As V por As III, y causando efectos en la salud de la población que ha consumido agua por ingesta.

Sin embargo, en la práctica, el equilibrio redox a menudo es lento y el potencial redox tiende a ser controlado por elementos mayores como oxígeno, carbono, nitrógenos, sulfuros y hierros, (Smedley & Kinniburgh, 2002).

En los acuíferos, la presencia de oxígeno es esencial para mantener un medio oxidante y la presencia de materia orgánica para mantener un medio reductor, (Custodio & Llamas, 1983).

El comportamiento del potencial redox, también es importante en relación con la solubilización del hierro y del manganeso, el cual se comporta de forma similar,

aunque es mucho menos abundante que el primero; se puede disolver en medios reductores y se precipita con mucha facilidad cuando el medio pasa a ser oxidante, (Custodio & Llamas, 1983).

El hidróxido férrico puede ser solubilizado si el potencial redox es bajo por transformación del Fe^{3+} en Fe^{2+} . Por el contrario, un potencial redox elevado previene su solubilización al impedir la existencia de iones Fe^{2+} .

4.6.2 Contaminación natural por arsénico

En el área de estudio, puntualmente, la calidad de las aguas superficiales y subterráneas se encuentra alterada por la contaminación natural de arsénico.

Con base a los resultados del muestreo en aguas superficiales y subterráneas realizado en octubre de 2013 y marzo de 2014, analizados en el laboratorio del CIRA-UNAN y resultados de INETER (2008), en agua subterránea se evaluó la contaminación natural por arsénico. Los resultados fueron comparados con la norma CAPRE (1994).

4.6.2.1 Arsénico en las aguas superficiales

Se establecieron tres sitios para muestreo de arsénico en el río principal, en la parte baja (Los Encuentros), en sección media (Hato Viejo), y zona alta (San José). Este último, únicamente en la época lluviosa, porque en la seca no presento flujo de agua base a finales de marzo de 2014, (gráfico 30).

En anexo 10.1 se muestran los sitios de muestreo en ríos (AS), de acuerdo a las dos campañas de muestreos realizadas y las concentraciones determinadas.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

En el periodo lluvioso se detectó arsénico (As) únicamente en la parte alta del río (San José) con concentración de 5.39 $\mu\text{g/l}$, determinado con base a un flujo de 1.68 m^3/s equivalente a 145,152 m^3/d . Por otra parte, la ausencia del mismo, en la parte baja y media del río principal (El Portillo), obedece a la dilución en el agua, a través de caudales moderados, aforados en la sección media y baja, siendo estos de 9.76 m^3/s igual a 843,264 m^3/d y 26.37 m^3/s convertidos en 2,278,368 m^3/d , respectivamente.

Las concentraciones de arsénico determinadas en época seca en la parte media y baja del río El Portillo, presentan 3.94 $\mu\text{g/l}$ para ambos sitios, estas determinadas en marzo de 2014. Los caudales base más próximo al mes de muestreo (mar-14) corresponden a los aforos realizados en enero de 2014, registrando caudales en la parte media y baja de 0.15 y 1.85 m^3/s .

De acuerdo a los resultados obtenidos de las dos campañas de muestreo las concentraciones de arsénico no sobrepasan el valor máximo admisible de la norma CAPRE (1994), establecido en 0.01 mg/l (10 $\mu\text{g/l}$).

No obstante, el recurso superficial en época lluviosa y parte de la seca, es utilizado para el abrevadero de ganado, exponiéndolo al consumo de agua con bajas concentraciones de arsénico, que con el tiempo podría causar efecto negativo al ser humano a través del consumo de carne de ganado bovino.

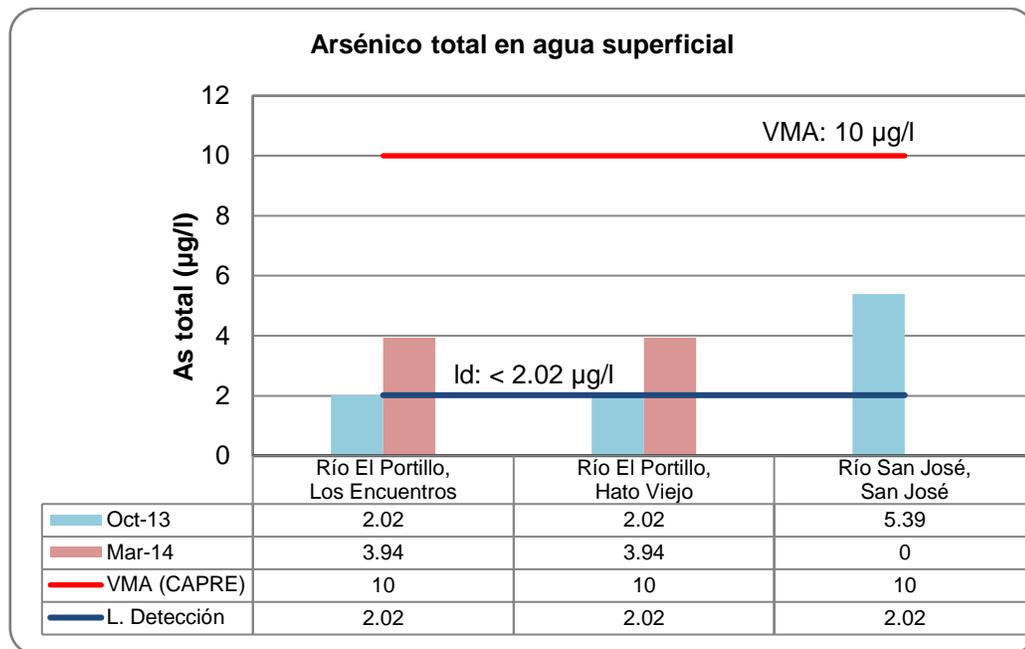


Gráfico 30. Concentraciones de arsénico total en agua superficial, muestreo oct-13 y mar-14

El cero (0) en tabla de datos del gráfico 30, indica que no se muestreo el sitio en la campaña de muestreo. El valor de 2.02 µg/l indica que el arsénico no fue detectado en el sitio de muestreo. VMA: Valor máximo admisible de norma CAPRE (1994). Id: Límite de detección.

4.6.2.2 Arsénico en las aguas subterráneas

La valoración de arsénico en aguas subterránea se realizó con los resultados de dos campañas de muestreo; para la primera se usaron 9 fuentes subterráneas (ocho pozos perforados y un excavado), en la época lluviosa; de estos se aprovechan en uso comunitario, red potable de ENACAL y abastecimiento de una escuela. En el segundo muestreo realizado en marzo de 2014, se densificó con 17 muestras, siendo de mayor interés, los pozos que presentaron contaminación por arsénico en la primera campaña, asimismo, en el entorno de estos se agregó un sitio para muestreo.

En anexo 10.1 se muestran los sitios de muestreo correspondientes a pozos perforados y excavados, estos de acuerdo a las campañas de muestreos realizadas y las concentraciones determinadas, además se presentan las concentraciones determinadas por INETER 2008, en un muestreo realizado en mayo de 2006, para ciertos pozos perforados.

Las mayor parte de los sitios de muestreo agregados en la segunda campaña de muestreo (8 pozos), se ubicaron teniendo en cuenta la dirección de los flujos de agua subterránea, ubicándolos aguas abajo de puntos muestreado en la primera campaña, para ello se consideró en primer instancia pozos perforados cercanos, de no contar con pozo perforado, se muestreo en pozo excavado; por otra parte se seleccionaron dos sitios de interés, encontrándolos estos aislados de los sitios muestreados en la primera campaña de muestreo (PP22 y PP31).

Cabe mencionar, que el único pozo excavado muestreado en la primera campaña, fue remplazado en la segunda campaña de muestreo, realizada en el periodo seco, por un pozo recién perforado de uso comunitario.

De las 17 muestras de agua de pozo en la época seca, 14 son de perforados y 3 en excavados, presentando mayor interés en los pozos perforados, debido a que estos captan flujos a mayor profundidad (30 – 55 m), mientras que los excavados drenan a nivel somero, entre los 10 a 15 m. Atendiendo la movilidad vertical y horizontal del arsénico, que podría influenciar la especiación de este metal en el acuífero.

De acuerdo al gráfico 31, de los 17 sitios muestreados, 4 presentan concentraciones por encima del valor de la norma CAPRE (1994), siendo los pozos PP4, PP11, PP20 y PP24, en localidades de Sabana Grande, La Suiza, Santa Bárbara y El Chaparral; los dos últimos tienen mayores concentraciones de arsénico tanto en época lluviosa como seca, oscilando de 12 a 17.4 µg/l; esto podría ser por el aporte significativo

de la meteorización de la roca. Estas cuatro fuentes anteriores, son aprovechadas para ingesta y actividades domésticas.

Especialmente, el **PP24** presenta el mayor riesgo de contaminación por altas concentraciones de arsénico en el agua (hasta 17.4 $\mu\text{g/l}$), ubicado en una escuela rural, que actualmente abastece a los escolares, principalmente niños y niñas menores de 12 años. Los resultados sugieren tomar acciones en beneficio de la población infantil.

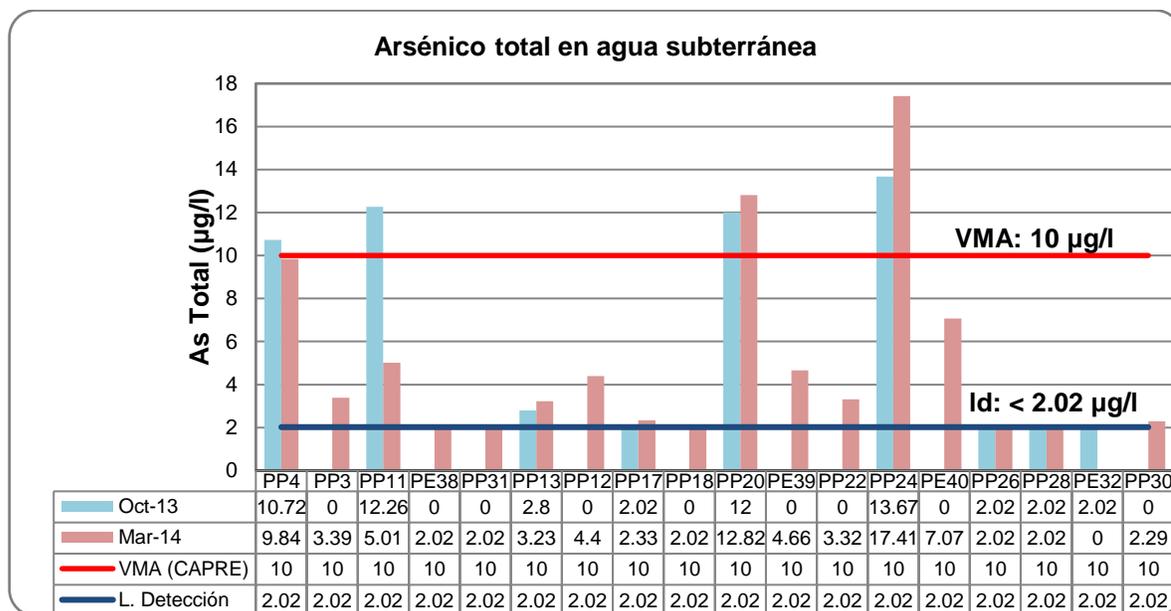


Gráfico 31. Concentraciones de arsénico total en agua subterránea, muestreo oct-13 y mar-14

El cero (0) en tabla de datos del gráfico 31, indica que no se muestreo el sitio en la campaña de muestreo. El valor de 2.02 $\mu\text{g/l}$ indica que el arsénico no fue detectado en el sitio de muestreo.

En tanto que, las menores concentraciones al valor máximo admisible (10 $\mu\text{g/l}$) para agua de consumo humano y mayores al límite detección (2.02 $\mu\text{g/l}$) determinadas en pozo perforado, se encontraron en las comunidades de San Nicolás (PP12 y PP13), Yugo Quebrado (PP17), El Pílon (PP22), Los Loros (PP30) y en el sector entre San José – Sabana Grande (PP3).

Los pozos perforados que no presentan afectación por arsénico, son los PP31, PP18, PP24 y PP26, donde los dos últimos sitios ubicados en La Laguneta y Las Pilas, fueron muestreado tanto en la época lluviosa como seca. Igualmente, se comprueba y ratifica esta situación favorable, con resultados de mayo de 2006, estudiado por INETER, 2008; lo cual, implicaría considerar el entorno de estas fuentes como más aptas para el abastecimiento de agua en el valle.

Según el gráfico 31, el PP11, ubicado en la comunidad La Suiza, presenta la máxima variación con 7.25 $\mu\text{g/l}$ de las concentraciones registradas en las épocas del año (lluviosa a seca), condición que podría ser atribuida por las aportaciones de flujos de aguas subsuperficiales procedentes de una quebrada que drena desde este a oeste, la cual tiene la naciente en el medio fracturado.

Además, la quebrada bordea al sitio evaluado a través de un meandro, en el cual los flujos subsuperficiales previo al ingreso del meandro siempre escurren hacia al oeste en dirección al sitio, posiblemente generado aporte del arsénico a través de la mezcla de agua subterránea con los flujos superficiales.

Los pozos de ENACAL que abastecen a ciudad del El Sauce, compuesta aproximadamente de 7,851 habitantes, es abastecida por cuatro pozos, de los cuales, 3 datan con más de 15 años y uno perforado en 2015; entre los pozos de vieja data están el PP16, PP17 y PP18, los dos últimos poseen registros actuales y antecedentes de concentraciones de arsénico, que se muestran en tabla 25.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Tabla 25. Concentraciones de arsénico en aguas de pozos de ENACAL

Código	Sitio de muestreo	Concentración (µg/l)		
		may-06	oct-13	mar-14
PP17	Yugo Quebrado, ENACAL	2.18	< ld	2.33
PP18	La Palomera, ENACAL	< ld	---	< ld

Fuente: Concentraciones may-06, INETER (2008)

De acuerdo a tabla 25, las concentraciones de arsénico en el PP17 (pozo Yugo Quebrado) se han mantenido en el tiempo, presentando concentraciones muy próximas al límite de detección y en muestreo de octubre de 2013 no fue detectado.

Con respecto al PP18 (La Palomera) ubicado al oeste del PP17 a una distancia aproximada de 675 m, no presenta contaminación por arsénico, en muestreo de marzo de 2014 y de INETER (2008).

De acuerdo a la dirección del flujo de agua subterránea y meteorización de la roca, la fuente PP17 se recarga de agua desde el sur y suroeste, mientras el PP17 del este y suroeste, debiéndose a esto la diferencia de concentraciones iónicas que presentan los sitios.

Se considera, la presencia de este metal es de origen natural, atribuida a la disolución de minerales de las rocas terciarias del Grupo Coyol Inferior. La concentración en las aguas subterráneas está fundamentalmente controlada por las interacciones agua-roca dentro del acuífero.

Los numerosos casos de “contaminación” natural de aguas subterráneas por arsénico que existen a nivel mundial están relacionados con ambientes geológicos muy diferentes: metasedimentos con filones mineralizados, formaciones volcánicas, formaciones volcano-sedimentarias, distritos mineros, sistemas hidrotermales, cuencas aluviales terciarias y cuaternarias, (Smedley & Kinniburgh, 2002).

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Los ambientes geológicos del acuífero intramontano corresponden a formaciones volcánicas y a cuenca aluviales terciarias y cuaternarias.

4.6.2.3 Zonas contaminadas por arsénico

De acuerdo a las valoraciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas de los resultados de arsénico en los sitios de muestreo de octubre de 2013, marzo de 2014 y registros antecedentes de INETER, se determinaron las zonalidades de concentración de arsénico en las aguas subterráneas del valle, (figura 38).

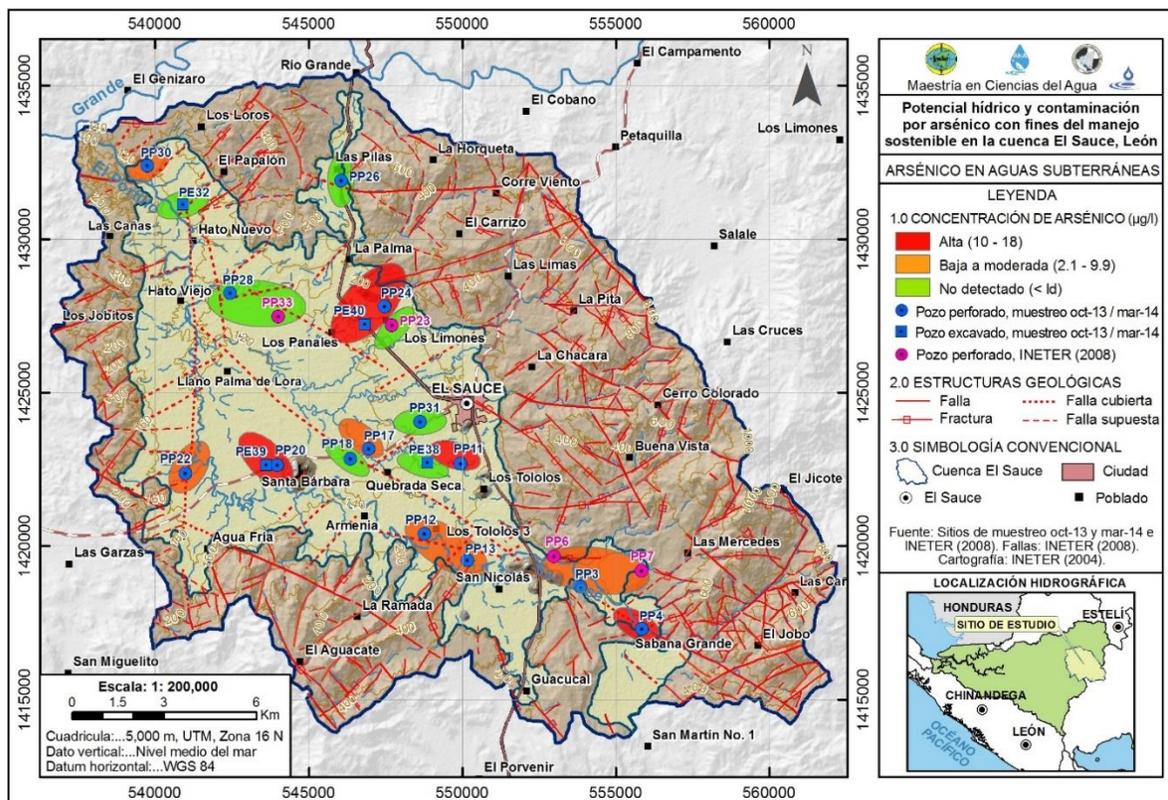


Figura 38. Mapa de distribución de concentración de arsénico en la cuenca El Sauce

Las localidades con mayor afectación por arsénico corresponden a El Chaparral, Los Limones y Santa Bárbara, con concentraciones alta (12 – 18 µg/l). En un segundo plano de contaminación de moderada a alta (4 - 13 µg/l), está Sabana Grande y La Suiza. Mientras, las comunidades Quebrada Seca, San Nicolás, Las Porras y El Veintiuno, tienen magnitudes de baja a moderada (2.1 – 6 µg/l). Finalmente, hay zonas favorables y seguras (no detectado, < ld), que se presentan en las localidades de La Palomera, Las Pilas y La Laguneta.

4.6.2.4 Arsénico a diferentes profundidades del acuífero

Las concentraciones de arsénico en el acuífero El Sauce aumentan para ciertos sitios cuando se alcanza mayores profundidades en el acuífero, lo que fue constatado al evaluar los resultados de muestreo en pozos perforados y excavados.

Tal situación se evalúa con los PP11 y PE38, separados entre sí a menos de 1 km, de igual manera el PP20 con PE39 y el PP24 con PE40; obteniéndose mayores concentraciones en los tres pozos perforados (aguas profundas), en cambio en los pozos excavados (aguas someras) son menores los valores de arsénico e incluso al límite de no detección. La diferencia de las concentraciones entre pozos perforados y excavados cercanos evaluados oscilan entre 3 – 10 µg/l, (gráfico 32).

Las mayores concentraciones determinadas en los pozos perforados, se debe a que estos captan flujo de mayor profundidad procedente de un medio mixto poroso-fracturado, encontrándose en unos casos a muchos metros de la superficie o subyacen a los sedimentos del cuaternario, que poseen más de 20 m de espesor.

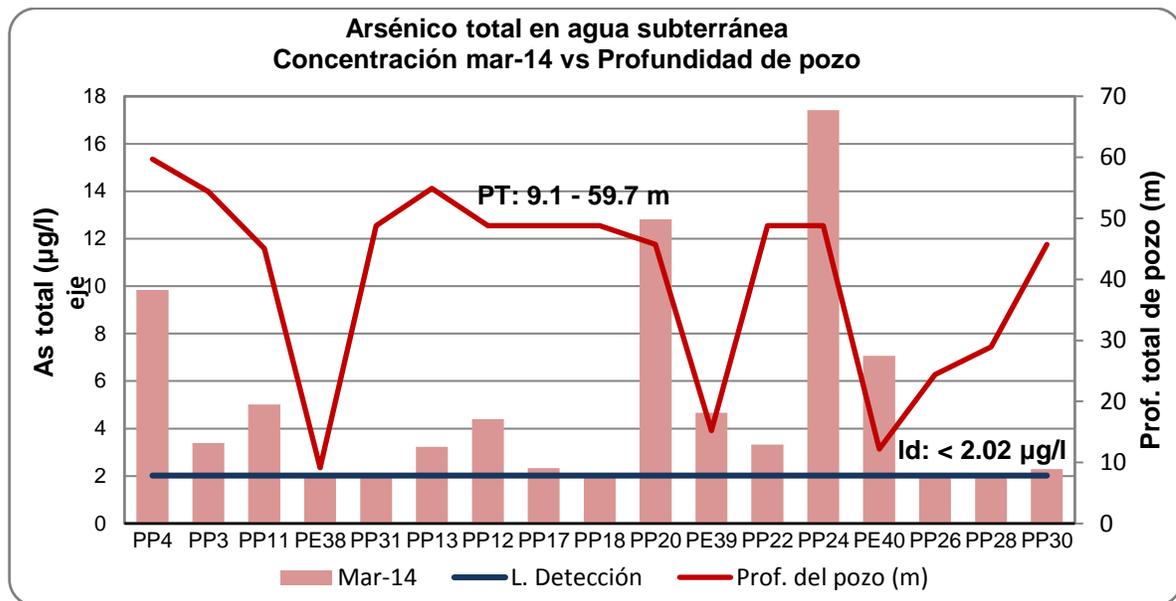


Gráfico 32. Concentraciones de arsénico total en época seca (mar-14) vs profundidad de los pozos

4.6.2.5 Concentraciones de arsénico en el tiempo

En el gráfico 33, se presentan las concentraciones de arsénico en los pozos que fueron muestreados en marzo de 2014 y por INETER (2008); de los 7 sitios comparados 4 continúan afectados por arsénico, no obstante, las concentraciones obtenidas en este estudio son mayores a la registrada por INETER en mayo de 2006. Sin embargo, en los resultados de otras investigaciones, ningún sitio, excedió el valor máximo admisible establecido por la CAPRE, a excepción de la fuente PP20 en Santa Bárbara, en el muestreo de marzo 2014 que sobrepasó el valor máximo admisible de la norma.

La diferencia de las concentraciones de los sitios comparados que presentan afectación por arsénico oscila entre 0.3 – 7.7 µg/l.

Por otra parte, los PP18, PP26 y PP28, no presentaron contaminación por arsénico en ambas campañas, otras investigaciones y del estudio.

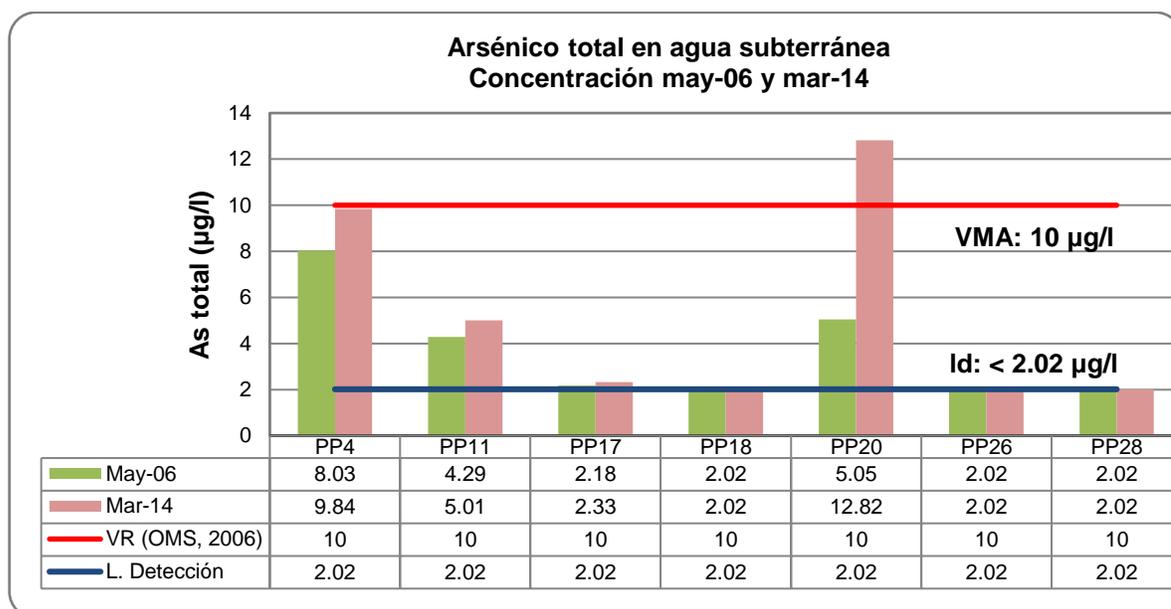


Gráfico 33. Concentraciones de arsénico total en agua subterránea, mayo 2006 vs marzo 2014
Fuente: Concentraciones de may-06, registradas por INETER (2008)

4.6.2.6 Especiación del arsénico en las aguas superficiales y subterráneas

El potencial redox (Eh) y el pH son parámetros físicos que valoran la especiación del arsénico (Smedley & Kinniburgh, 2002); para este estudio fue evaluada para la época lluviosa, ya que la seca no se contó con registro de potencial redox.

El pH oscilan entre 5.1 a 6.8, encontrando las aguas superficiales en condiciones ácidas y ligeramente ácidas, mientras las aguas subterráneas en un medio ácido; mientras el redox oscila dese -206.8 a -104.8 mV, presentando condiciones reductoras, tanto en agua superficial y subterránea. En cuanto a las concentraciones de oxígeno disuelto oscila desde 0.8 mg/l en el agua subterránea a 9.4 mg/l en agua superficial, debido al contacto con el oxígeno atmosférico.

Los valores de pH, potencial redox y concentraciones de oxígeno disuelto en aguas superficiales y subterráneas, registradas para la época lluviosa (oct-13) se muestran en anexo 10.2.

En gráfico 34, se muestra la relación pH-Eh registrado en época lluviosa, donde los tres primeros sitios (AS1, AS2 y AS3) corresponden a agua superficial y los demás a agua subterránea. En general los 12 sitios de muestreos se encuentran en ambientes reductores y con pH inferiores a 7 para el periodo evaluado.

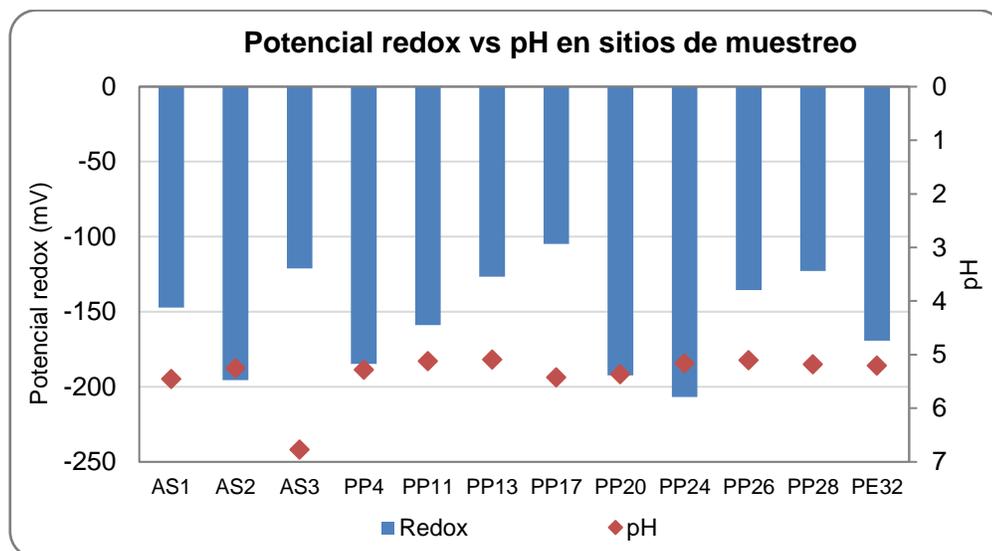


Gráfico 34. Relación pH – Eh de los sitios de muestreo en época lluviosa

Con base a la relación pH – Eh la especiación del arsénico presente en las muestras de aguas superficiales y subterráneas (3 en ríos y 9 en pozos), el mismo se encuentra en forma de arsenito (As III) como ácido arsenioso (H_3AsO_3), (gráfico 35).

Esta especiación se considera que obedece a un pH ácido y un ambiente reductor en el acuífero, debido a las rocas ácidas que predominan en el área.

En aguas subterráneas contaminadas con arsénico y con bajas concentraciones de oxígeno disuelto predomina la especie de arsénico (III), que es la especie de arsénico más tóxica y más móvil en el agua subterránea dentro del acuífero del valle.

No obstante, el agua subterránea en la cuenca y el acuífero El Sauce con especiación arsenito (As III) al pasar a ambiente oxidante podría encontrarse como arsenato (As V) en la época de seca, debido al aumento de las concentraciones de oxígeno disuelto y del pH.

En aguas subterráneas los ambientes reductores (bajas concentraciones de oxígeno), el arsénico (III) como (H_3AsO_3) se vuelve estable, existiendo la especie antes mencionada, en un rango de pH entre 0 a 9 unidades de pH.

La toxicidad del arsénico se incrementa considerablemente con la reducción de su estado de oxidación de As (V) a As (III), como consecuencia, se producen cambios de arsenato por arsenito, que podrían estar causando efectos en la salud de la población que ha consumido agua por ingesta por mucho tiempo y que excede los 10 $\mu\text{g/l}$.

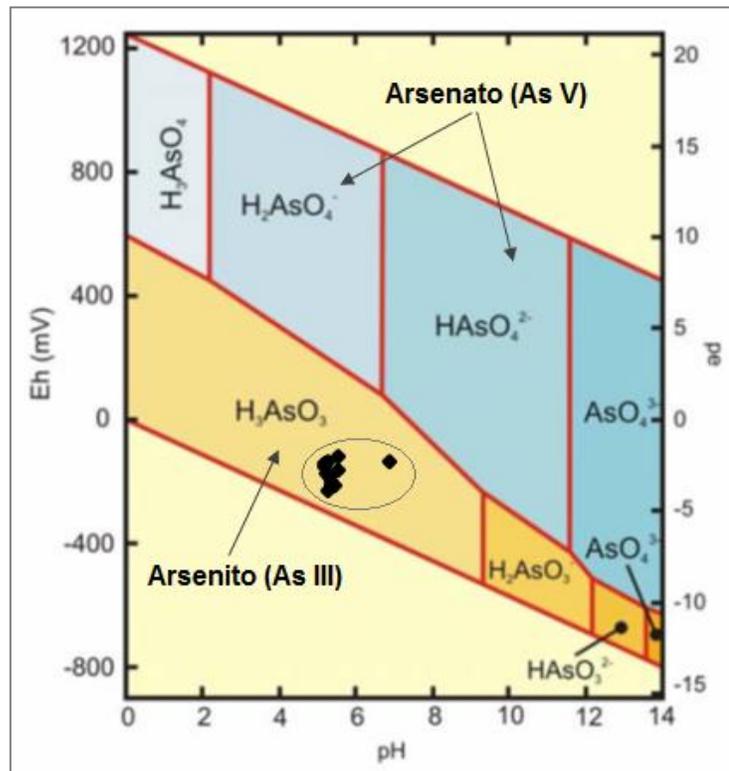


Gráfico 35. Adaptado de *Diagrama Eh-pH de especies de arsénico*, de Litter et al, 2009. Especiación del arsénico en las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca El Sauce, octubre 2013.

4.7 Líneas de estrategias para el manejo sostenible de los recursos hídricos en la cuenca

La cuenca El Sauce por su posición geográfica, donde la superficie de la misma está representada por el 97% del municipio de El Sauce y 3% el municipio de Santa Rosa del Peñón, lo que implica que el manejo de los recursos hídricos le corresponda principalmente al municipio de El Sauce.

La agricultura y la ganadería, son las principales actividades económicas en la cuenca, sin embargo, la manera en que estas se desarrollan tienden a limitar la sostenibilidad de los recursos, estas han provocado la tala de árboles para la

producción de cultivos, como consecuencia, se tiene la erosión de los suelos y reducción de la infiltración.

Por otra parte, el manejo inapropiado de los recursos naturales acentuado tanto en la parte central del valle, como en las parte altas y bajas de la cuenca, están generando serios problemas ambientales y sociales que ponen en riesgo la posibilidad de alcanzar un desarrollo sostenible en la cuenca y la de su entorno.

En la cuenca aproximadamente el 70% de la economía depende del agua subterránea y el otro 30% de las aguas superficiales, por tanto, establecer las líneas de estrategias dirigidas a la conservación y sostenibilidad de los recursos, contribuirá a sostener el potencial del acuífero para uso futuro.

Los principales usuarios son los productores de los sectores agrícola y ganadero, claves en la toma de decisiones sobre el manejo de los recursos agua y suelo, los que deben de incorporarse a la gestión sostenible del recurso, con el propósito de que sean participe de las medidas que contribuyen a la conservación y sostenibilidad de los recursos en la cuenca.

Por otra parte, el uso y aprovechamiento sustentable del agua depende de las prácticas de manejo, y de múltiples factores entre los que destacan: la educación con relación al agua; las formas de organización, características y la eficiencia de las instituciones que atienden los recursos hídricos.

Las condiciones de desarrollo socioeconómico actual en el municipio de El Sauce, y el grado de aprovechamiento del acuífero del valle de El Sauce y en lo sucesivo el enfoque integral del manejo de agua subterránea, requieren de una adecuada gestión del recurso. Para esto, es necesaria la formulación de líneas de acción

dirigida a la gestión del recurso hídrico, a fin de contribuir con la sostenibilidad de la cuenca.

Para plantear acciones de gestión integral de la cuenca, se tomarán en cuenta la gestión ante la contaminación de las aguas por arsénico, usos del recurso agua y conservación del mismo, en las diferentes etapas de desarrollo del municipio.

4.7.1 Gestión ante la contaminación natural por arsénico

Los resultados de este estudio demuestran la contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas y superficiales, encontrando sitios que presentan concentraciones mayores al valor máximo admisible de la norma CAPRE (1994), y en otros casos con concentraciones próximas a este.

Como consecuencia de la presencia de este metal en las aguas de la cuenca en estudio, se requiere proponer planes de tratamiento de agua potable, los que deben enfocarse en parte a este tipo de contaminación, sin olvidar otros parámetros que podrían requerir también atención, como son las características física-químicas, biológicas, sustancias inorgánicas de origen antropogénicos, así como la valoración de otros metales originados por el medio geológico de la zona.

Las fuentes afectadas por la contaminación de arsénico, requiere de medidas inmediatas que contribuyan a prevenir afectaciones en la salud de la población, para ello se sugiere implementar la aplicación de algunas tecnologías que implique remoción de arsénico.

Teniendo en cuenta, que las mayores fuentes afectadas se ubican en comunidades rurales con bajo recursos económicos, se presenta algunas de las tecnologías para la remoción de arsénico en el agua, de bajo y mediano costo, presentando la

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

eficiencia, ventajas y desventajas de estas tecnologías que podrían emplearse y evaluarse en comunidades con alto contenido de arsénico en las aguas para consumo de humano.

Estas alternativas se presentan de acuerdo a la solución que brindan, en unos casos estas son de uso comunitario y domiciliario, en otros casos solo de aplicación comunitaria.

En tabla 26, se presentan las tecnologías de remoción sugerida, donde las primeras tres tecnologías son de implementación comunitaria y domiciliario, mientras las demás únicamente de solución comunitaria.

Tabla 26. Tecnologías disponibles para la remoción del arsénico de solución comunitaria y domiciliario

Tecnología	Eficiencia de remoción		Costos relativos	Ventaja	Desventaja
	As (III)	As (V)			
Adsorción*	30 - 60%	<90%	Mediano	Remueve grandes concentraciones de arsénico.	El arsénico se deposita en el medio adsorbente y se necesita más tratamiento.
Coagulación con hierro*	60 - 90%	<90%	Bajo	De bajo costos, eficiente.	Formación de óxidos de hierro en la tubería.
Coagulación con aluminio*	<30%	<90%	Bajo	Remueve TDS; eficiencia del 95%; tecnología disponible comercialmente.	Aumenta la presencia de aluminio en el agua.
Coagulación mejorada	60 - 90%	<90%	Bajo - mediano	Remueve gran número de sustancias de distinta naturaleza, eliminando a bajos costos.	Altos costos si la coagulación no está bien dosificada.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Tecnología	Eficiencia de remoción		Costos relativos	Ventaja	Desventaja
	As (III)	As (V)			
Coagulación / Coprecipitación	<30%	<90%	Bajo	Baja inversión de capital. Especial para aguas con alto contenido de Fe – Mn.	Problemas en la disposición de los efluentes.
Oxidación química	<30%	30 - 60%	Bajo	De fácil aplicación a escala piloto.	Subproductos no deseados.
Oxidación / Filtración	<30%	60 - 90%	Mediano	En aguas con altos contenidos de hierro y manganeso.	El agua tratada contiene una mayor concentración de arsénico (III).
Oxidación <i>in situ</i> / Inmovilización	60 - 90%	<90%	Mediano	De bajo costos.	Altas concentraciones del metaloide.

Fuente: Hidalgo & Villalobos (2011)

*Tecnología disponible para la remoción de arsénico de solución comunitaria y domiciliar

Para los sitios que presentan altas concentraciones de arsénico ubicados en las localidades de El Chaparral, Santa Bárbara, La Suiza y MABE de Sabana Grande requieren del uso de las tecnologías de remoción a fin de reducir la exposición del arsénico, ya que en todos los casos el agua extraída es para ingesta y de uso doméstico, de no aplicar ninguna, se recomienda la clausura de los pozos.

De acuerdo a los resultados del estudio, las localidades que podrían ser consideradas como zonas aptas para futuras perforaciones de campos de pozos, se ubican las localidades de La Esperanza y La Laguneta, ubicadas en parte noroeste del valle; así mismo otra zona identificada corresponde al abanico aluvial que desciende desde la localidad de Las Pilas, sector norte de la cuenca.

Finalmente, las entidades gubernamentales y no gubernamentales que contribuyen con el abastecimiento de agua de la población que reside en la cuenca, deben realizar un plan de comunicación social dirigido a todas las comunidades mayormente afectadas que contemple los aspectos relacionados con la intoxicación por arsénico, así como aspectos relacionados con la higiene comunal.

4.7.2 Desarrollo de abastecimiento de agua potable

La zona de mayor aprovechamiento en la cuenca El Sauce, se ubica al suroeste de la ciudad El Sauce, en esta se concentran los cuatros pozos que abastecen a la población urbana del municipio, aun cuando los resultados de este estudio, clasifican a dicha localidad como una zona de producción moderada de aguas subterráneas, se deberán tomar medidas que contribuyan al manejo sostenible en la cuenca en esa zona.

Por tanto, las nuevas perforaciones para proyectos a futuro, se deberán tener en cuenta otras zonas de aprovechamientos, la que podrían ubicarse al oeste, noroeste y norte de las zonas aprovechada actualmente por ENACAL.

La red de abastecimiento potable de la ciudad de El Sauce data aproximadamente desde hace 20 años, lo que puede estar provocando pérdidas por tubería, por ello la renovación de redes de abastecimiento debe también contemplarse en los planes de desarrollo de la cuenca, a fin de reducir los volúmenes de aguas extraído del acuífero.

De acuerdo a los resultados de la prospección geofísica realizado por INETER (2008), la zona de los Llanos Palma de Lora, podría ser zonas con buen potencial de agua subterránea, sin embargo, son áreas que requieren de una valoración de

calidad del agua física química, biológica y de sustancia inorgánica, en está valorando la contaminación por arsénico.

La ubicación de nuevos campos de pozos de agua potable para las comunidades del área de estudio, se deberá procurar perforar en áreas alejadas a los sitios que presentan contaminación por arsénico, entre las que sobresalen El Chaparral, Santa Bárbara, La Suiza y Sabana Grande. Así mismo es conveniente tener en cuenta la dirección de los flujos de agua subterráneas a fin de no captar los flujos de aguas contaminados por arsénico.

Por otra parte, para la protección del recurso agua en la parte alta de la cuenca, se deberá desarrollar actividades de reforestación, cambios de uso de la tierra, reducción de asentamientos humanos y pastoreo del ganado, a fin de contribuir con la recarga del acuífero desde las partes altas y reducir la contaminación antropogénica en estas.

En cuanto a la parte media de cuenca, la cual corresponde en gran parte al área del valle, urge la reforestación, las que podrían llevarse a través de áreas dispersas, ya que actualidad el interior del valle se compone principalmente de áreas destinadas a cultivos anuales, áreas con pasto para el pastoreo de ganado, así mismo, se encuentran extensas áreas cubiertas con jícaros y pastos, en las cuales se debería implementar cambio de uso del suelo.

Deben realizarse monitoreo periódico del agua de los pozos, por parte de las instituciones responsables, con el propósito de conocer el estado de la calidad del acuífero y de acuerdo a los resultados elaborar el plan de prevención y mitigación.

Los pozos habilitados deben de estar provisto de al menos áreas de protección de 6 x 6 m aproximado, que deberán estar cercadas y no se permitirá dentro de ellas

ninguna actividad ajena a la operación y mantenimiento de los pozos, esto con el fin de reducir la contaminación antropogénica en las fuentes.

Una de las afectaciones de acuerdo a la inadecuada protección de las fuentes subterráneas aprovechadas, es la construcción de letrinas cerca de los pozos de abastecimiento rural, donde la mayor parte de estos no cuentan con las medidas de protección sanitarias que contribuyan con la potabilidad segura del recurso.

Aunque exista estudio de la calidad del agua, realizado por INETER (2008) se propone una evaluación de las variables físicas y químicas, biológicas, valoración de metales pesados a distintas profundidades, siendo de prioridad la valoración del arsénico, este originado por el medio geológico, así como sustancias inorgánicas persistentes de origen antropogénico (plaguicidas y agroquímicos), dicha evaluación deberá tener como prioridad los pozos de bombeo para abastecimiento de agua, con el objetivo de disponer con información segura y actualizada de la calidad del agua subterránea.

La sostenibilidad de los proyectos de Comités de Agua Potable y Saneamiento (CAPS) no debe ser capacitados únicamente en operación y mantenimiento de los sistemas, sino también en el monitoreo de la calidad del agua, de manera continua.

4.7.3 Desarrollo agropecuario

El municipio de El Sauce tiene un potencial de producción agrícola y pecuaria, de estas actividades la agrícola demanda el mayor aprovechamiento de las aguas subterráneas.

Actualmente las tierras de labores son aprovechadas extensivamente, empleado la diversificación y rotación de cultivos anuales, en cuanto a los cultivos permanentes,

no presentan amenaza referida a una explotación intensiva del recurso, dado que en el valle no existen considerable extensiones de áreas destinadas al riego, las principales afectaciones podrían derivarse de la utilización de los diferentes agroquímicos, ya que por tratarse de un acuífero somero, es vulnerable a la contaminación de las aguas.

De acuerdo a los resultados del estudio, la actividad pecuaria, no es la de mayor demanda de agua; sin embargo, esta es la que causa mayor impacto en el interior del valle, debido a que las áreas de pastoreo avanzan por el desarrollo de la misma, compactando los suelos y modificando el uso de los suelos.

Las áreas destinadas al pastoreo de ganado bovino y área de siembra requieren de la implementación de mejoras en el uso de la tierra a través de prácticas que aumenten la cobertura vegetal del suelo y mejorar la infiltración del agua. Para ello se tendrán que desarrollar actividades tales como:

- Rehabilitación de la cobertura vegetal a través de la regeneración natural, evitando la tala y quema del recurso foresta y los cambios de uso de los suelos.
- Control de la erosión hídrica, introduciendo y manteniendo la cobertura vegetal dispersa y áreas de bosques ubicadas en la parte alta de la cuenca.
- Aumento de la infiltración de agua a través de que contribuyen a la retención de la escorrentía, barreras vivas, barreras muertas, entre otras.
- Fomentar la producción limpia, utilizando cultivos orgánicos, promoviendo el control biológico y la fertilización del suelo con productos orgánicos.

- Implementar con los agricultores nuevas alternativas productivas, como la introducción de cultivos no tradicionales, hortalizas, árboles frutales, así mismo, realizando las labores agrícolas del terreno perpendicular a la dirección a la escorrentía.

4.7.4 Desarrollo forestal

La cuenca El Sauce en áreas adyacentes al parteaguas de la zona noreste, este y sureste cuenta con áreas dispersas de bosques de coníferas, de poca extensión, las que contribuyen con el paisajismo en la zona y recarga del acuífero fracturado ubicados en zonas de laderas.

En zona alta, pero de menor elevación a la zonas adyacente al parteaguas este, cuenta con una zona de reserva, la cual se considera como una de las principales zona de recarga de la cuenca del río El Portillo, esta se ubica en la comunidad El Borbollón, Mercedes Centro, entre otras, dicha zona cuenta con un potencial ecoturístico en la zona, presentando montañas y quebradas de flujos permanentes, donde puede realizarse turismo de montaña.

Para el turismo de montaña se requiere la recuperación de la vegetación, mediante planes de reforestación, con especies adecuadas al tipo de suelo de la zona, la que consecuentemente podría traducirse en la recuperación de la flora y reproducción de la fauna en la zona.

No obstante, la principal afectación a la que está sometida la cuenca, obedece a la deforestación de la misma, ya que está, no cuentan con considerables áreas de bosques de conservación que contribuyan con la recarga hídrica de las aguas subterráneas, siendo las áreas más afectada y desprotegida la zona sur, suroeste, oeste y norte, así como la zona del valle alojado en interior de la cuenca.

Con el establecimiento de nuevas áreas de bosque y ampliación de las áreas de bosques de protección se tendrá mayor aporte de la recarga hídrica, reducción de erosión hídrica, sumando a está, que las prácticas agrícolas realizadas tanto en la zona de laderas con en el interior del valle se eviten la tala y quema de los recursos forestales.

4.7.5 Aplicación de políticas en el agua subterránea

El gobierno local en conjunto con instituciones gubernamentales y ONG, deben unificar esfuerzos en la elaboración de las líneas de gestión y desarrollo integral de los recursos hídricos en la cuenca, estableciendo los controles necesarios para proteger las fuentes de agua, así como también la sostenibilidad del recurso a largo plazo, a fin de garantizar el uso de recurso a las futuras generaciones.

Las líneas de estrategias deben estar englobados en un Plan de Acción, único que refleje los usos del agua y las medidas de conservación y recuperación del recurso hídrico.

En tabla 27, se muestran líneas estratégicas que contemplan acciones a corto, mediano y largo plazo, tomadas en cuenta por los diferentes actores en la cuenca.

Tabla 27. Líneas estratégicas de acción a corto, mediano y largo plazo

Líneas estratégicas	Acciones			Instituciones / Actores
	Corto	Mediano	Largo	
Gestión ante la contaminación de arsénico	Implementación de tecnologías para remoción de arsénico	Método diagnóstico de detección de arsenicismo		Alcaldía, MINSA, Nuevo FISE, ONG's
	Clausura de fuentes con altas concentraciones de arsénico (> 10 µg/l)			
	Vigilancia de las fuentes de agua que presentaron concentraciones moderadas de arsénico (<10 µg/l)			
	Medidas de prevención para la intoxicación			
Desarrollo de abastecimiento de agua potable	Calidad físico-química, microbiológica y de sustancias inorgánicas en las aguas subterráneas	Ampliación de la red de abastecimiento de agua rural	Ampliación de la red de abastecimiento de agua a la población urbana	Alcaldía, MINSA, ENACAL, Nuevo FISE, ONG's
	Perforación de pozos en las pequeñas comunidades.	Instalación de la red alcantarillado sanitario y planta de tratamiento de aguas residuales		
	Mantenimiento y limpieza de pozos comunitarios	Establecimiento de áreas de protección para pozos comunitarios y privados		

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Líneas estratégicas	Acciones			Instituciones / Actores
	Corto	Mediano	Largo	
Desarrollo agropecuario	Implementación de alternativas para disminuir erosión hídrica y aumento en la infiltración	Producción de cultivos resistentes a las sequías	Proyectos de riego para cultivos de hortalizas	Alcaldía, MAG, INTA, ONG's, Productores
	Rotación de cultivos anuales y permanentes	Desarrollo de producción agroforestal, sistemas agrosilvopastoriles		
	Control de los caudales de extracción de agua subterránea			
Desarrollo forestal	Ampliación de las zonas de bosques existentes para la contribución de recarga hídrica	Establecimiento de nuevas zonas de protección con bosques de conservación para la contribución de recarga hídrica	Turismo de montaña	Alcaldía MARENA INAFOR Productores
	Control de tala y quema de los recursos forestales	Regeneración natural del bosque autóctono	Pago por servicios ambientales	

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Al finalizar el presente trabajo, se expone las consideraciones que en correspondencia de los resultados son de relevancia, para manejarse en el desarrollo de la planificación de la cuenca El Sauce, dirigido al aprovechamiento racional de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca. Se presentan de forma síntesis el desglose de las conclusiones producto de las investigaciones hidrológicas e hidrogeológicas:

1. El río El Portillo posee régimen permanente en la zona de descarga, sin embargo, algunos tributarios principales reducen sus caudales significativamente en época seca, debido al comportamiento pluviométrico y al medio físico adverso.
2. El área central se constituye de un acuífero poroso, libre y somero, compuestos de materiales sedimentarios, aluviales y volcánicos, en cambio la zona alta y de ladera se encuentran mantos fracturado y aislado, debido a sistema de fallas.
3. Se considera buenas características hidráulicas del acuífero en el centro del valle, que permite favorable aprovechamiento, por cuanto en este, la transmisividad, caudales de producción y capacidad específica, son significativas; sin embargo, en zonas fracturadas la producción de agua es reducida.
4. El comportamiento hidrodinámico del agua subterránea de los años evaluados indica descenso moderado del acuífero, atribuido principalmente a la reducción de las precipitaciones en el tiempo.

5. Las isofreáticas en la cuenca adquieren un movimiento natural, rigiéndose a la topografía, estas oscilan desde los 225 – 110 msnm, los flujos de agua escuren radialmente convergiendo en zona de descarga en dirección noroeste.
6. Existe una disponibilidad de volumen excedente, según los resultados del balance hidrogeológico del periodo evaluado, el cual podría ser aprovechado sosteniblemente, aplicando uso extensivo.
7. Los parámetros fisicoquímicos de las aguas indican afectación por termalismo puntual moderado en la zona sureste; además sugieren que son ligeramente ácidas en periodo seco y con mayor acidificación en el lluvioso, se acusa posiblemente afectación del medio geológico y en relación a la conductividad eléctrica promedio, está es inferior al valor de la norma CAPRE.
8. Las concentraciones de arsénico (III), se corresponden tanto a aguas superficiales y subterráneas, sin embargo, en la primera, están por debajo y en la segunda por encima la norma vigente. Esta especiación se considera, que obedece a un pH ácido y un ambiente reductor en el acuífero, debido a las rocas ácidas que predominan en el área.
9. Existe necesidad de ejecución de proyectos de abastecimiento de agua en las zonas rurales, además con estrategias de concientizar a la población para el manejo sostenible del recurso hídrico.
10. Es imperativo mayor vigilancia a los recursos hídricos por la contaminación natural de arsénico, y establecer medidas para reducir la ingesta de aguas contaminadas.

CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES

El aprovechamiento racional y seguro de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca El Sauce, deberá estar asociada con las actividades de investigación relacionadas al medio ambiente y en beneficio de la población que reside en está, para ello es necesario tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Instalar estación hidrometeorológica principal (HMP) e hidrológica, así como establecer redes de vigilancia de cantidad y calidad de las aguas superficiales y subterráneas, con el objetivo de disponer de registros históricos.
2. Mejorar las zonas de recarga de la cuenca, a través de la reforestación en la parte alta y áreas afectadas, así como en riberas de los ríos en el interior del valle, a fin de reducir la erosión y aumentar la infiltración.
3. Para proyectos de abastecimiento de agua se deberán realizar perforación en las zonas que actualmente presentan baja densidad de pozos, encontrándose esta al oeste y centro del valle.
4. Clausurar las fuentes subterráneas que presentaron altas concentraciones de arsénico ($> 10 \mu\text{g/l}$), ubicadas en las comunidades de Santa Barbará, La Suiza y en la escuela El Chaparral.
5. Establecer vigilancia permanente en los pozos que presentaron concentraciones de arsénico inferiores al valor máximo admisible, e implementando tecnologías que ayuden a la remoción del metal.

6. Aprovechar de manera controlada las aguas subterráneas en las áreas donde no se detectó arsénico, asegurándose que el cono de abatimiento no alcance zonas con alteración hidrotermal, portadoras de arsénico.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía El Sauce. (2018). *Datos de línea base*. El Sauce, Nicaragua: Alcaldía municipal El Sauce.
- Alcaldía El Sauce;. (2007). *Censo municipal*. El Sauce, Nicaragua.
- Altamirano, M. (2005). *Distribución de la contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la subcuenca suroeste del Valle de Sebaco, Matagalpa-Nicaragua. Tesis de maestría CIRA/UNAN*. Managua, Nicaragua.
- Basso, E. (1977). *Delimitación de cuenca hidrográficas. Metodo de Basso*. Proyecto Hidrometeorológico Centro Americano (PHCA).
- CAPRE. (1994). *Normas de Calidad de Agua para Consumo Humano*. San José, Costa Rica: Primera edición.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología subterránea. Tomo I y II* (II ed.). Barcelona, España: Omega S.A.
- Fenzl, N. (1989). *Nicaragua: Geografía, clima, geología e hidrogeología*. Managua, Nicaragua: Belém, UFGA/INETER/INAN.
- Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology*. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Flores, Y. (2002). *Criterios hidrogeológicos para formulación del plan de gestión en el acuífero del Valle de Sébaco. Tesis de maestría CIRA/UNAN*. Managua, Nicaragua.
- González, R. (2002). *Estudio sobre la calidad del agua y riesgo de contaminación de los pozos de abastecimiento públicos en el Valle de Sébaco, Matagalpa. Tesis de maestría CIRA/UNAN*. Managua, Nicaragua.
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). *Reference crop evapotranspiration from temperature*.

- Hidalgo, J., & Villalobos, H. (2011). Arsénico en el agua potable: casos y remoción. *Hidrogénesis*.
- Hodgson, G. (1972). *Geología y anotaciones mineralógicas de la planicie noroeste y de la precordillera Occidental*. Managua, Nicaragua.
- Hodgson, G. (2000). *Introducción al léxico estratigráfico de Nicaragua*. Managua, Nicaragua.
- Ibañez, S., Gisbert, J., & Moreno, H. (2010). *Génesis de suelos*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- INAA. (2001). *Normas técnicas para el diseño de sistemas de abastecimiento y potabilización de agua. Normas NTOM 09003-99*. Managua, Nicaragua.
- INETER. (2005). *Clasificación de climas según temperatura, precipitación y ciclo estacional. Köppen modificado*. Managua, Nicaragua.
- INETER. (2006). *Mapas topográficos de la región del Pacífico de Nicaragua, a esc. 1:50,000*. Managua, Nicaragua.
- INETER. (2008). *Estudio de potenciales y calidad de los acuíferos del norte de León y Chinandega cuenca El Sauce*. Managua, Nicaragua.
- INETER. (2010). *Atlas Climático de Nicaragua*. Managua, Nicaragua, Nicaragua.
- INETER. (2018). *Datos climatológicos de estaciones meteorológicas*. El Sauce, Nicaragua.
- INETER, MARENA, UNA, MAG, & INAFOR. (2015). *Mapa de suelos de Nicaragua*. Managua, Nicaragua.
- INETER, UNI, MAG, ANA, & GIZ. (2014). *Cuencas hidrográficas de Nicaragua bajo la metodología Pfafstetter*. Managua, Nicaragua.
- INIDE. (2008). *El Sauce en Cifras. Estimación y proyecciones de la población nacional, departamental y municipal*. Managua, Nicaragua.

- INIDE, & MAGFOR. (2013). *IV Censo Nacional Agropecuario. Departamento de León y sus municipios: Uso de la tierra y el agua en el sector agropecuario*. Managua, Nicaragua.
- Instituto Geográfico Nacional. (1985). *Mapa Geológico*. Managua, Nicaragua.
- INTA, & MEFCCA. (2019). *Guía Técnica. Establecimiento y manejo del cultivo del plátano con plantas in vitro*. Managua, Nicaragua.
- Israelsen, & Hanzen. (1979). *Propiedades físicas del suelo según textura*.
- Krásný, J., & Heht, G. (1998). *Estudio hidrogeológico e hidroquímico de la región del Pacífico de Nicaragua*. Managua, Nicaragua.
- Litter, M. (2010). *Possible treatments for arsenic removal in Latin American waters for human consumption*. Buenos Aires, Argentina.
- Litter, M., Armienta, M., & Farías, S. (2009). *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelo*.
- MIMAM. (1998). *El Libro Blanco del Agua en España*. Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente.
- Peña, E. (2005). *Disponibilidad y aprovechamiento sostenible del acuífero de Nandaime. Tesis de maestría CIRA/UNAN*. Managua, Nicaragua.
- Pereira, L., Valero, J., Picornell, M., & Tarjuelo, J. (2010). *El riego y sus tecnologías*. Albacete, España: Centro Regional de Estudios del Agua.
- Reynolds, W., & Elrick, D. (1990). *Ponded infiltration from a single ring: Analysis of steady flow*.
- Sánchez, J. (2012). *Hidráulica de captaciones: Fundamentos*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Schosinsky, G. (2007). *Calculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídricos de suelos*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Servicio Geológico Nacional. (1972). *Mapa geológico, hoja 2854 – I y II, hoja 2954 – III y IV, 1:50,000*. Managua, Nicaragua.

Shosinsky, G., & Losilla, M. (1999). *Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Smedley, P., & Kinniburgh, D. (2002). *A review of the source, Behaviour and distribution of arsenic in natural waters*. Italia.

UNESCO. (2006). *Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas*. Montevideo, Uruguay.

UNICEF. (2004). *Contribución al estudio de cinco zonas contaminadas naturalmente por arsénico en Nicaragua*. Nicaragua.

<https://chg-ftpout.geog.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/>

[https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.ph](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)

p

CAPÍTULO 8. ANEXOS

Anexo I. Variables climáticas

Anexo 1.1 Precipitación de estación pluviométrica Los Tololos, INETER 2004 – 2014; Datos CHIRPS 2015 – 2018

Estación: LOS TOLOLOS / LEÓN
 Departamento: LEÓN
 Latitud: 12°51'30"
 Años: 2004 - 2018
 Parámetro: Precipitación (mm)

Código: 60031
 Municipio: EL SAUCE
 Longitud: 86°32'00"
 Elevación: 160 msnm
 Tipo: PV

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Suma
2004	0.0	10.5	28.8	12.5	60.1	63.7	215.2	66.9	219.4	369.8	15.3	0	1,062.2
2005	0.0	0	58.7	19	288.8	188.6	331	275.2	135.8	419.7	0	0	1,716.8
2006	0.0	0.0	14.8	26.1	146.1	303.4	156.7	93.8	384.9	172.8	61.5	66	1,426.1
2007	31.5	0.0	0.0	30.7	252.2	214.9	89.4	246.9	222.6	306.5	44.1	29.3	1,468.1
2008	0	0.0	0	0.0	149.5	153.5	151.1	272	436.7	383.8	0	0	1,546.6
2009	0.0	0	0.0	0	46	104.8	99	82.3	104.5	37.8	185.1	0	659.5
2010	0	5.1	14.2	245.3	417.0	484.2	427.2	649.5	773.9	321.3	56.3	0	3,394.0
2011	0.0	0.0	0.0	44.3	342.0	246.7	377.7	395.5	495.3	860.3	13.4	0.0	2,775.2
2012	0.0	0.0	0.0	58.3	156.2	448.3	17.0	354.7	191.4	488.4	0.0	0.0	1,714.3
2013	0.0	0.0	18.8	27.6	124.5	103.4	137.5	165.2	515.0	423.2	112.9	0.0	1,628.1
2014	0.0	0.0	0.0	0.0	137.1	33.4	16.5	122.1	23.1	488.9	0.0	0.0	821.1
2015	1.1	1.8	5.7	26.5	60.3	253.2	53.7	27.2	256.8	219.8	162.8	9.2	1,078.1
2016	1.0	2.0	4.9	31.0	209.4	207.8	59.0	192.9	238.7	359.9	191.1	26.8	1,524.7
2017	1.8	1.9	4.8	32.2	341.0	245.2	161.9	174.3	304.3	516.3	83.5	11.0	1,878.2
2018	1.3	1.8	4.0	78.2	399.0	220.1	13.1	78.6	217.3	655.3	48.3	4.5	1,721.5
Suma	36.7	23.0	154.7	631.7	3129.2	3271.2	2305.9	3197.1	4519.8	6023.9	974.4	146.8	24,414.5
Media	2.4	1.5	10.3	42.1	208.6	218.1	153.7	213.1	301.3	401.6	65.0	9.8	1,627.6
Max	31.5	10.5	58.7	245.3	417.0	484.2	427.2	649.5	773.9	860.3	191.1	66.0	3,394.0
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	46.0	33.4	13.1	27.2	23.1	37.8	0.0	0.0	659.5

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 1.2 Precipitación de estación pluviométrica La Laguneta, INETER 2004 – 2014; Datos CHIRPS 2015 – 2018

Estación:	LAGUNETA / LEÓN							Código:	60029					
Departamento:	LEÓN							Municipio:	EL SAUCE					
Latitud:	12°54'20"							Longitud:	86°35'50"					
Años:	2004 - 2018							Elevación:	130 msnm					
Parámetro:	Precipitación (mm)							Tipo:	PV					
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Suma	
2004	0.0	0.0	0	0	121.3	116.8	144.2	155.7	417.8	340.1	21.8	0	1,317.7	
2005	0.0	0	54.3	16.5	410.1	413.8	397.7	425.7	246.0	702.5	38.8	0	2,705.4	
2006	0.0	0.0	0.0	25.0	342.6	320.6	187.3	237.9	631.6	489.7	216.7	0	2,451.4	
2007	0.0	0.0	0.0	64.9	506.5	271.6	160.9	693.1	612.3	989.5	0	0	3,298.8	
2008	0	0.0	0	0.0	207.8	187.8	429.1	292	828.5	575.8	48.1	0	2,569.1	
2009	0.0	0	0.0	0	328.8	467.8	95.6	84.4	181.5	60.5	70.9	0	1,289.5	
2010	0	0	0.0	114.2	510.9	644.1	552.5	564.7	993.7	438.3	34.9	0	3,853.3	
2011	0.0	0.0	0.0	0.0	309.4	300.5	381.0	464.7	606.5	1055.1	0.0	0.0	3,117.2	
2012	0.0	0.0	0.0	179.7	514.8	577.6	34.7	402.5	246.2	449.1	0.0	0.0	2,404.6	
2013	0.0	0.0	0.0	0.0	139.4	188.9	242.5	208.1	500.0	555.7	91.4	0.0	1,926.0	
2014	0.0	0.0	0.0	0.0	94.4	51.0	20.3	250.6	470.2	447.6	24.6	0.0	1,358.7	
2015	1.4	1.7	4.9	24.6	63.3	230.6	48.5	24.7	229.5	213.4	159.3	17.4	1,019.3	
2016	1.6	1.7	3.2	31.3	190.3	196.3	66.5	196.7	217.9	344.7	168.3	18.8	1,437.1	
2017	2.0	1.7	4.6	33.7	334.2	231.6	165.7	153.9	279.6	415.6	64.0	12.0	1,698.7	
2018	1.6	1.7	2.5	87.0	355.9	204.1	13.3	76.5	200.0	508.8	33.7	7.1	1,492.3	
Suma	6.6	6.8	69.5	577.0	4429.8	4403.1	2939.8	4231.2	6661.3	7586.4	972.5	55.2	31,939.1	
Media	0.4	0.5	4.6	38.5	295.3	293.5	196.0	282.1	444.1	505.8	64.8	3.7	2,129.3	
Max	2.0	1.7	54.3	179.7	514.8	644.1	552.5	693.1	993.7	1055.1	216.7	18.8	3,853.3	
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	63.3	51.0	13.3	24.7	181.5	60.5	0.0	0.0	1,019.3	

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 1.3 Precipitación de estación pluviométrica El Pilón, INETER 2004 – 2014; Datos CHIRPS 2015 – 2018

Estación:	EL PILÓN / LEÓN						Código:	60027					
Departamento:	LEÓN						Municipio:	EL SAUCE					
Latitud:	12°51'40"						Longitud:	86°36'50"					
Años:	2004 - 2018						Elevación:	130 msnm					
Parámetro:	Precipitación (mm)						Tipo:	PV					
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Suma
2004	0.0	32.5	0	0	83.1	33.2	204.2	140.5	187.6	253.2	16	0	950.3
2005	0.0	0	62	53.8	281.1	393	221	231.1	152.2	469.7	44.9	21.2	1,930.0
2006	0.0	0.0	0.0	0.0	91.8	211.7	137.8	46.8	412.7	282.8	61.1	0	1,244.7
2007	0.0	0.0	15.2	0	367.4	186.8	174.6	528.6	615	780	80.1	0	2,747.7
2008	0	2.2	0	59.6	254.8	236.5	66.1	140.2	596.8	391.5	0	0	1,747.7
2009	0.0	0	0.0	0	317	308.9	104.7	67.1	80.2	104	155.1	0	1,137.0
2010	0	0	19.3	227.7	429.5	419.3	390.3	450.7	839.9	277.4	0	0	3,054.1
2011	0.0	0.0	0.0	8.5	196.8	269.7	406.7	373.9	495.6	1046.4	24.5	0.0	2,822.1
2012	0.0	0.0	0.0	144.8	359.6	261.8	65.8	297.6	301.9	412.3	8.3	0.0	1,852.1
2013	0.0	0.0	45.4	50.7	144.7	172.7	149.2	127.0	342.4	330.4	93.8	0.0	1,456.3
2014	0.0	0.0	0.0	0.0	50.7	209.0	11.9	149.3	222.0	276.2	0.0	0.0	919.1
2015	0.7	1.7	5.8	26.3	63.1	233.4	43.9	29.0	251.6	216.1	180.4	13.0	1,065.0
2016	0.7	1.9	3.7	32.1	206.8	195.4	59.7	196.2	233.9	348.2	207.9	21.1	1,507.7
2017	1.0	1.8	5.8	34.5	363.3	234.6	163.4	168.2	283.0	425.1	74.3	10.2	1,765.0
2018	0.9	1.7	3.6	98.8	399.7	214.9	12.1	74.2	206.9	564.7	34.7	5.9	1,618.2
Suma	3.3	41.8	160.8	736.8	3609.5	3580.8	2211.5	3020.4	5221.7	6178.1	981.2	71.4	25,817.1
Media	0.2	2.8	10.7	49.1	240.6	238.7	147.4	201.4	348.1	411.9	65.4	4.8	1,721.1
Max	1.0	32.5	62.0	227.7	429.5	419.3	406.7	528.6	839.9	1046.4	207.9	21.2	3,054.1
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	50.7	33.2	11.9	29.0	80.2	104.0	0.0	0.0	919.1

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 1.4 Precipitación de estación pluviométrica Los Loros, INETER 2004 – 2014; Datos CHIRPS 2015 – 2018

Estación:	LOS LOROS / LEÓN							Código:	60032					
Departamento:	LEÓN							Municipio:	EL SAUCE					
Latitud:	12°57'20"							Longitud:	86°35'00"					
Años:	2004 - 2018							Elevación:	170 msnm					
Parámetro:	Precipitación (mm)							Tipo:	PV					
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Suma	
2004	0.0	20.0	0	27.7	129.4	120.3	100.6	95.5	498.1	406.7	22.8	0	1,421.1	
2005	0.0	0	38.5	17.7	347.9	427	329.5	337	239.8	702.4	8.7	0	2,448.5	
2006	0.0	0.0	0.0	51.3	425.5	294.2	93.3	188.5	305.2	291.2	93.7	22.2	1,765.1	
2007	0.0	0.0	0.0	56.9	409.2	153.1	138.8	700.5	528.4	550.5	66.6	0	2,604.0	
2008	0	0.0	0	31.4	297.2	123.5	316.5	331.5	594.2	491.7	0	0	2,186.0	
2009	0.0	0	0.0	0	357.8	334.9	127.6	76.7	130.2	52.7	71.9	0	1,151.8	
2010	0	0	0.0	237.6	499.2	348.6	380.6	490	695.7	416.6	88.3	0	3,156.6	
2011	0.0	0.0	0.0	47.2	335.1	331.5	440.7	415.1	492.8	826.2	77.4	0.0	2,966.0	
2012	0.0	0.0	0.0	182.4	541.4	301.7	32.0	453.3	263.7	369.4	0.0	0.0	2,143.9	
2013	0.0	0.0	0.0	0.0	142.7	126.8	201.5	204.2	406.8	503.7	87.9	0.0	1,673.6	
2014	0.0	0.0	0.0	21.2	84.1	145.8	26.4	181.7	439.2	343.0	0.0	0.0	1,241.4	
2015	1.4	1.6	5.2	24.1	70.2	224.7	49.1	24.0	220.3	205.9	140.3	29.7	996.6	
2016	1.5	1.7	3.7	32.4	178.4	181.1	71.2	193.2	209.1	342.1	142.3	26.3	1,382.9	
2017	1.9	1.7	4.9	30.6	327.6	229.4	165.0	147.3	286.8	403.5	64.9	18.6	1,682.2	
2018	1.5	1.7	2.3	82.5	322.8	197.1	14.3	79.4	198.7	467.6	33.3	10.3	1,411.6	
Suma	6.3	26.7	54.6	843.0	4468.6	3539.7	2487.1	3917.9	5509.0	6373.2	898.1	107.0	28,231.2	
Media	0.4	1.8	3.6	56.2	297.9	236.0	165.8	261.2	367.3	424.9	59.9	7.1	1,882.1	
Max	1.9	20.0	38.5	237.6	541.4	427.0	440.7	700.5	695.7	826.2	142.3	29.7	3,156.6	
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	70.2	120.3	14.3	24.0	130.2	52.7	0.0	0.0	996.6	

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 1.5 Precipitación de estación pluviométrica La Montaña, INETER 2004 – 2016; Datos CHIRPS 2017 – 2018

Estación:	LA MONTAÑA /	Código:	690113
Departamento:	LEÓN	Municipio:	SANTA ROSA DEL PEÑON
Latitud:	12°53'30"	Longitud:	86°25'24"
Años:	2004 - 2018	Elevación:	680 msnm
Parámetro:	Precipitación (mm)	Tipo:	PV

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Suma
2004	0.0	0.0	0	26.9	172.2	169.6	69	76.8	717.2	404.5	126.3	3.2	1,765.7
2005	0.0	1	1.2	94.5	105.5	434.5	241.7	238.3	181.3	718.2	16	0	2,032.2
2006	1.0	0.0	0.0	30.7	186.5	286.6	150.6	173	223.3	635.7	86.5	13	1,786.9
2007	0.2	0.0	0.0	40.6	51.8	309.9	156.8	452.4	688.6	1110	110.1	10.7	2,931.1
2008	1.5	0.0	0	73.5	255.1	358.1	79.9	115.7	328.8	809.1	103.2	26	2,150.9
2009	0.5	0	0.0	0	354.2	333.3	46.2	111.6	33.3	68.9	60.1	110	1,118.1
2010	0	0	0.0	66.7	255.4	389.2	455.2	1359.8	895	133.1	0	1.5	3,555.9
2011	0.0	0.0	10.7	21.7	145.9	223.2	295.3	199.3	254.0	364.8	64.9	1.0	1,580.8
2012	1.4	0.0	0.0	80.3	212.8	218.9	75.0	139.0	145.3	194.0	11.4	10.3	1,088.4
2013	11.0	0.0	0.0	1.0	102.6	108.6	373.5	132.1	302.2	49.5	89.4	2.0	1,171.9
2014	0.0	0.0	0.0	0.0	22.2	10.7	1.0	86.8	194.9	401.9	46.5	0.1	764.1
2015	2.4	0.0	0.0	0.0	20.4	144.9	31.6	27.7	102.2	239.0	85.3	0.0	653.5
2016	0.3	0.0	0.0	59.8	85.4	72.5	43.9	103.7	90.8	182.0	145.9	94.6	878.9
2017	2.9	3.2	6.4	33.2	329.9	218.2	125.5	157.1	300.3	523.8	91.7	12.3	1,804.5
2018	2.1	2.9	4.9	62.2	384.4	199.7	13.2	69.0	226.5	626.9	37.9	6.6	1,636.3
Suma	23.3	7.1	23.2	591.1	2684.3	3477.9	2158.4	3442.3	4683.6	6461.4	1075.2	291.3	24,919.1
Media	1.6	0.5	1.5	39.4	179.0	231.9	143.9	229.5	312.2	430.8	71.7	19.4	1,661.3
Max	11.0	3.2	10.7	94.5	384.4	434.5	455.2	1359.8	895.0	1110.0	145.9	110.0	3,555.9
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	20.4	10.7	1.0	27.7	33.3	49.5	0.0	0.0	653.5

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 1.6 Temperatura media de estación hidrometeorológica principal León, (Aeropuerto Godoy) INETER 2004 – 2018

Estación: LEÓN (AEROP.GODOY)
 Departamento: LEÓN
 Latitud: 12°25'36"
 Años: 2004 - 2018
 Parámetro: Temperatura media (C°)

Código: 64043
 Municipio: LEÓN
 Longitud: 86°54'48"
 Elevación: 60 msnm
 Tipo: HMP

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Media
2004	27	28	29.8	29.2	28.9	28.4	27.5	27.3	26.6	26.7	26.2	26.8	27.7
2005	27.4	28	28.7	29.1	28.3	27.3	27.5	27.7	26.5	25.5	26.4	26.6	27.4
2006	27	27.7	28.7	29	28.5	26.9	27.9	27.5	26.9	26.8	25.9	26.9	27.5
2007	27.8	27.9	29.4	29	27.8	27.2	27.2	26.1	26.2	25.5	26.2	25.9	27.2
2008	26.5	27.2	28.3	28.8	27.6	27.3	27	26.8	26.3	25.5	25.7	26.3	26.9
2009	26.9	27.6	27.8	29.3	28.4	26.9	27.7	28	27.7	26.9	26.6	27.2	27.6
2010	27.2	28.4	28.7	29.6	28.2	26.9	26.5	26.6	26	26.6	25.3	24.8	27.1
2011	26.8	28.2	27.9	28.5	28.4	26.8	26.5	27.1	26.4	25.4	26.1	26.2	27.0
2012	27.1	27.9	28.9	27.8	27.3	27.2	28	27.3	26.9	26.2	26.6	27.1	27.4
2013	28.1	28.6	29.1	30	28.6	27.7	27.7	27.4	26.3	26.7	26.5	26.6	27.8
2014	27	28.1	29.4	30.4	29.5	28.6	30.1	28.3	26.8	26.4	26.6	26.6	28.2
2015	27.7	28	29.4	30.5	30.6	28.9	29	29.8	28.2	27.4	27.2	28.3	28.8
2016	28.0	29.4	30.0	30.0	28.7	27.4	28.3	28.4	27.2	26.6	26.2	26.3	28.0
2017	26.7	27.5	29.0	29.6	28.0	27.3	27.7	27.3	27.1	26.5	26.5	26.6	27.5
2018	27.1	27.9	30.3	31.4	31.0	28.9	28.6	28.5	27.2	26.0	27.2	27.0	28.4
Suma	408.3	420.4	435.4	442.2	429.9	413.7	417.2	414.1	402.2	394.7	395.2	399.3	414.4
Media	27.2	28.0	29.0	29.5	28.7	27.6	27.8	27.6	26.8	26.3	26.3	26.6	27.6
Max	28.1	29.4	30.3	31.4	31.0	28.9	30.1	29.8	28.2	27.4	27.2	28.3	29.2
Min	26.5	27.2	27.8	27.8	27.3	26.8	26.5	26.1	26	25.4	25.3	24.8	26.5

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 1.7 Temperatura mínima de estación hidrometeorológica principal León, (Aeropuerto Godoy) INETER 2004 – 2018

Estación:	LEÓN (AEROP.GODOY)							Código:	64043					
Departamento:	LEÓN							Municipio:	LEÓN					
Latitud:	12°25'36"							Longitud:	86°54'48"					
Años:	2004 - 2018							Elevación:	60 msnm					
Parámetro:	Temperatura mínima (C°)							Tipo:	HMP					
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Media	
2004	20.5	21.4	23.4	23.6	24.1	23.6	22.6	22.5	22.6	22.8	21.2	19.5	19.5	
2005	19.8	21	23.3	23.7	23.9	23.9	22.9	23.4	22.7	22.7	21.9	20.9	19.8	
2006	20.2	20.9	22.5	23.1	23.8	22.9	23.3	23.3	22.3	23.1	21.0	21.3	20.2	
2007	21.5	20.9	22.7	23.6	23.6	22.8	22.5	22.4	22.3	22.4	21.1	19.8	19.8	
2008	19.9	21.2	22.1	23.5	23.1	22.9	22.6	22.7	22.7	22.4	20.7	19.8	19.8	
2009	20.2	21.1	21.8	23.5	23.2	23	22.9	22.9	22.8	22.6	21.8	21.2	20.2	
2010	20.7	22.5	22.9	24.7	23.9	23.5	23.1	23.2	23.3	22.7	20.4	18.3	18.3	
2011	20.5	21.5	21.8	23.3	23.8	23.3	22.6	23	22.8	22.3	20.9	19.9	19.9	
2012	20.4	21.6	22.9	22.9	23.3	22.8	22.4	22.9	22.3	22.4	20.9	20.9	20.4	
2013	21.9	22.6	23.5	25.2	23.9	23.5	23.2	23.0	22.9	22.7	22.1	20.7	20.7	
2014	20.5	21	22.5	24.2	24.8	23.9	24.0	23.3	22.9	22.8	21.5	20.6	20.5	
2015	21.1	21.2	23.9	24.9	25.1	24.6	23.9	24.2	23.6	23.6	22.6	22.6	21.1	
2016	21.8	23.3	24.6	25.0	24.3	23.3	23.0	23.5	23.0	23.0	21.4	20.8	20.8	
2017	20.2	21.6	22.7	24.0	24.0	23.2	22.8	23.2	23.5	22.7	21.9	21.0	20.2	
2018	20.6	21.6	22.8	23.9	23.8	23.1	23.1	23.2	22.9	22.4	22.0	21.0	20.6	
Suma	309.8	323.3	343.4	359.1	358.6	350.3	344.9	346.8	342.5	340.7	321.4	308.2	301.8	
Media	20.7	21.6	22.9	23.9	23.9	23.4	23.0	23.1	22.8	22.7	21.4	20.5	22.5	
Max	21.9	23.3	24.6	25.2	25.1	24.6	24.0	24.2	23.6	23.6	22.6	22.6	21.1	
Min	19.8	20.9	21.8	22.9	23.1	22.8	22.4	22.4	22.3	22.3	20.4	18.3	18.3	

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 1.8 Temperatura máxima anual de estación hidrometeorológica principal León, (Aeropuerto Godoy) INETER 2004 – 2018

Estación:	LEÓN (AEROP.GODOY)							Código:	64043				
Departamento:	LEÓN							Municipio:	LEÓN				
Latitud:	12°25'36"							Longitud:	86°54'48"				
Años:	2004 - 2018							Elevación:	60 msnm				
Parámetro:	Temperatura máxima (C°)							Tipo:	HMP				
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Media
2004	34	35.2	36.5	36.6	35.2	34.4	34.2	34.1	32	32.0	32.3	34.4	36.6
2005	34.8	35.1	36	35.9	34.1	32.1	33	33.8	32	29.6	32.2	32.9	36.0
2006	33.6	34.6	35.7	36.1	35.3	32.3	33.6	33.7	33	32.0	32	33.3	36.1
2007	34.4	35.2	36.6	36.1	33.8	32.7	33.3	31.7	31.8	30	32	32.7	36.6
2008	33	34.1	35.3	35.9	33.6	32.7	32.8	32.1	31.2	30.5	31.7	33.2	35.9
2009	33.7	34.2	35	36.5	35.1	32.3	33.7	34	34.3	32.6	32.2	33.7	36.5
2010	34	35.2	36	36.4	33.1	32.1	31.4	31.7	30.4	31.6	30.9	31.9	36.4
2011	33.5	35	35.1	35.8	34.4	32.1	32.2	32.7	32	30	32.1	33.1	35.8
2012	33.7	34.2	35.8	34.6	33.2	32.6	34.3	33.6	32.9	31.5	32.7	34.2	35.8
2013	34.3	35.3	35.6	36.9	34.9	32.8	33.3	33.3	31.3	32.3	31.8	32.7	36.9
2014	33.4	34.6	36	37	35.9	34.5	36.6	34.8	32.6	31.4	32	33.1	37.0
2015	34	34.7	35.9	36.9	37	34.2	34.5	36.2	34.7	32.7	32.5	34.6	37.0
2016	34.6	36.0	36.6	36.4	34.4	32.7	34.4	34.7	32.7	31.7	31.8	32.4	36.6
2017	33.2	34.3	36.0	36.5	33.5	32.5	33.5	32.8	32.3	31.2	32.2	33.0	36.5
2018	33.9	34.4	35.8	36.2	33.3	32.7	34.3	35.4	33.2	30.8	33.1	33	36.2
Suma	508.1	522.1	537.9	543.8	516.9	492.6	505.1	504.6	486.3	469.9	481.5	498.3	545.9
Media	33.9	34.8	35.9	36.3	34.5	32.8	33.7	33.6	32.4	31.3	32.1	33.2	33.7
Max	34.8	36.0	36.6	37.0	37.0	34.5	36.6	36.2	34.7	32.7	33.1	34.6	37.0
Min	33.0	34.1	35.0	34.6	33.1	32.1	31.4	31.7	30.4	29.6	30.9	31.9	35.8

Anexo 1.9 Cálculo de la Evapotranspiración de referencia (ETP₀) y corregida (ETP_c) para la Estación Aeropuerto por fórmula de Hargreaves Simplificada

Mes	Promedios mensuales de temperatura				Radiación extraterrestre		Evapotranspiración potencial			
	Temp Max. (°C)	Temp Med (°C)	Temp Min (°C)	(T _{Max} -T _{Min}) ^{0.5}	R ₀ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	R ₀ (mm/d)	ETP diario (mm/d)	Días mes	ETP ₀ mens. (mm/mes)	ETP _c mens. (mm/mes)
Ene.	33.9	27.2	20.7	3.64	30.9	12.61	4.7	31	147.1	132.4
Feb.	34.8	28.0	21.6	3.64	33.8	13.79	5.3	28	148.1	133.3
Mar.	35.9	29.0	22.9	3.60	36.5	14.89	5.8	31	179.0	161.1
Abr.	36.3	29.5	23.9	3.51	38.0	15.50	5.9	30	177.4	159.7
May.	34.5	28.7	23.9	3.25	38.0	15.50	5.4	31	166.8	150.1
Jun.	32.8	27.6	23.4	3.08	37.6	15.34	4.9	30	147.9	133.1
Jul.	33.7	27.8	23.0	3.27	37.6	15.34	5.3	31	163.0	146.7
Ago.	33.6	27.6	23.1	3.24	37.8	15.42	5.2	31	161.9	145.7
Sept.	32.4	26.8	22.8	3.10	36.9	15.06	4.8	30	143.4	129.1
Oct.	31.3	26.3	22.7	2.93	34.5	14.08	4.2	31	129.9	116.9
Nov.	32.1	26.3	21.4	3.27	31.5	12.85	4.3	30	127.8	115.0
Dic.	33.2	26.6	20.5	3.56	30.0	12.24	4.4	31	137.9	124.1
T media	33.7	27.6	22.5				TOTAL		1830.1	1647.1

R₀ = Radiación solar extraterrestre, (tabulada) ETP₀: Evapotranspiración potencial sin corregir, ETP_c: Evapotranspiración potencial corregida

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo II. Caudales en ríos de la cuenca El Sauce

Anexo 2.1 Sitios de aforos

ID	Río	Sitio	Coordenadas		Elev. (msnm)
			Este	Norte	
A1	El Portillo, parte baja	Los Encuentros	537700	1433277	102
A2	El Portillo, parte media	Llano Palma de Lora	541251	1425838	123
A3	San José	San José	553500	1419452	192
A4	La Palma	Eduardo Contreras	542296	1428341	128
A5	Quebrada Seca	La Esperanza	542971	1426727	127

Anexo 2.2 Dimensiones de secciones de aforo y caudales, abril 2013

ID	Río	w (m)	h (m)	v (m/s)	Q (m ³ /s)
A1	El Portillo, parte baja	7.50	0.18	0.10	0.19
A2	El Portillo, parte media	0	0	0	0
A3	San José	0	0	0	0
A4	La Palma	1.95	0.07	0.02	0.00
A5	Quebrada Seca	9.50	0.17	0.03	0.06

Anexo 2.3 Dimensiones de secciones de aforo y caudales, octubre 2013

ID	Río	w (m)	h (m)	v (m/s)	Q (m ³ /s)
A1	El Portillo, parte baja	44.20	0.85	0.59	26.37
A2	El Portillo, parte media	17.60	0.52	0.82	9.76
A3	San José	17.50	0.37	0.22	1.68
A4	La Palma	11.50	0.32	0.76	4.13
A5	Quebrada Seca	19.80	0.35	0.96	8.14

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en
la cuenca El Sauce, León

Anexo 2.4 Dimensiones de secciones de aforo y caudales, enero 2014

ID	Río	w (m)	h (m)	v (m/s)	Q (m ³ /s)
A1	El Portillo, parte baja	10.00	0.43	0.25	1.85
A2	El Portillo, parte media	1.50	0.08	0.61	0.10
A3	San José	5.50	0.15	0.12	0.15
A4	La Palma	3.60	0.14	0.36	0.30
A5	Quebrada Seca	8.05	0.15	0.74	1.10

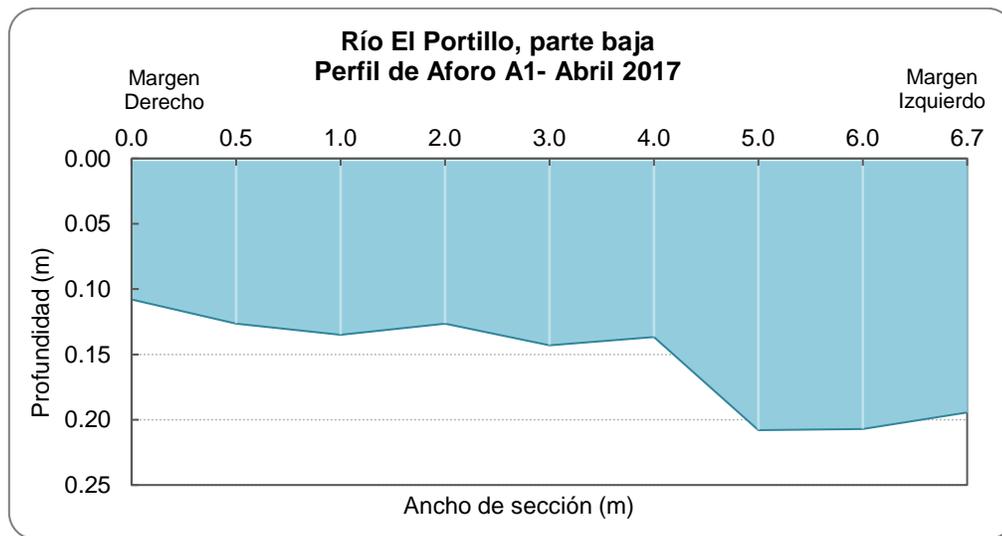
Anexo 2.5 Dimensiones de secciones de aforo y caudales, abril 2017

ID	Río	w (m)	h (m)	v (m/s)	Q (m ³ /s)
A1	El Portillo, parte baja	6.7	0.15	0.09	0.12
A2	El Portillo, parte media	0	0	0	0
A3	San José	0	0	0	0
A4	La Palma	0	0	0	0
A5	Quebrada Seca	8.6	0.15	0.02	0.04

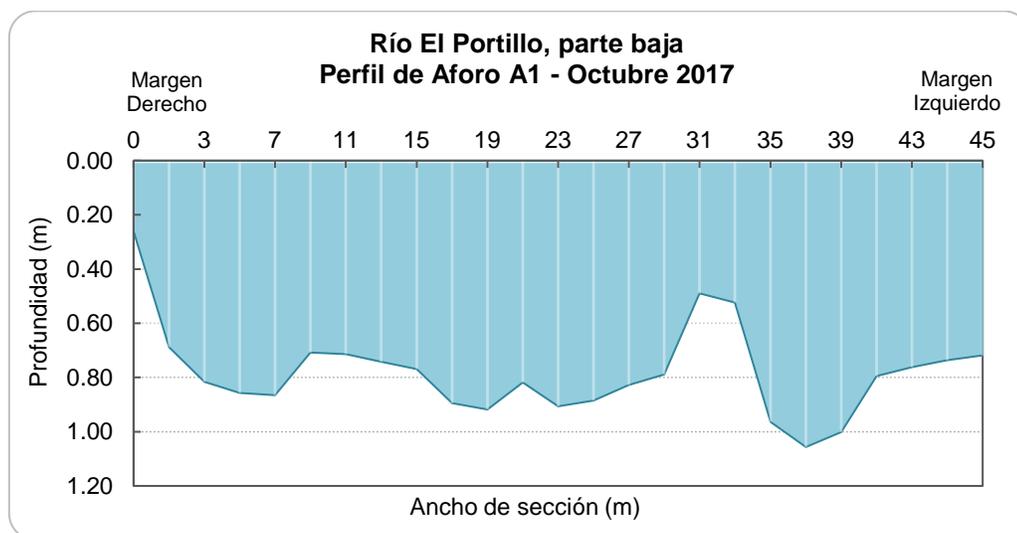
Anexo 2.6 Dimensiones de secciones de aforo y caudales, octubre 2017

ID	Río	w (m)	h (m)	v (m/s)	Q (m ³ /s)
A1	El Portillo, parte baja	44.60	0.78	0.52	21.42
A2	El Portillo, parte media	17.90	0.44	0.76	7.54
A3	San José	17.70	0.31	0.20	1.36
A4	La Palma	12.70	0.28	0.64	3.45
A5	Quebrada Seca	19.90	0.32	0.89	6.98

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

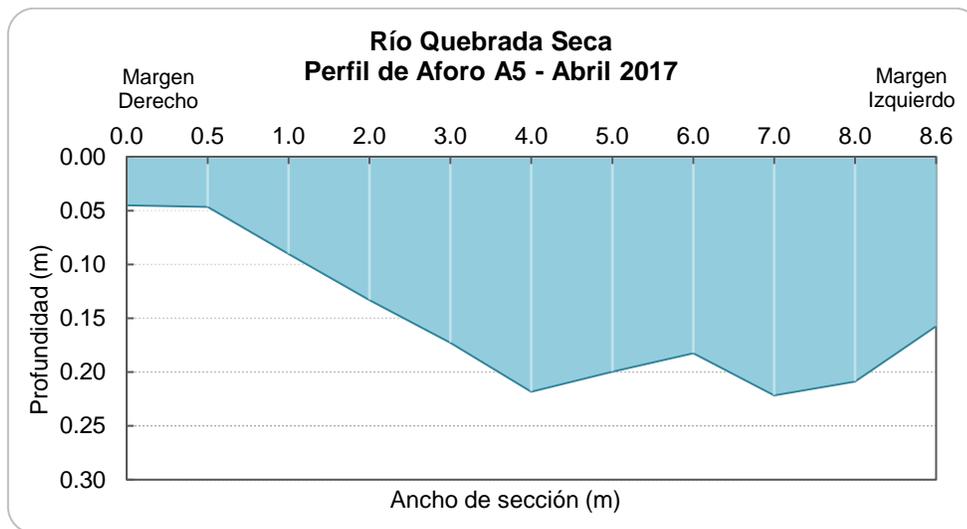


Anexo 2.7 Sección de aforo río El Portillo, parte baja, abril 2017

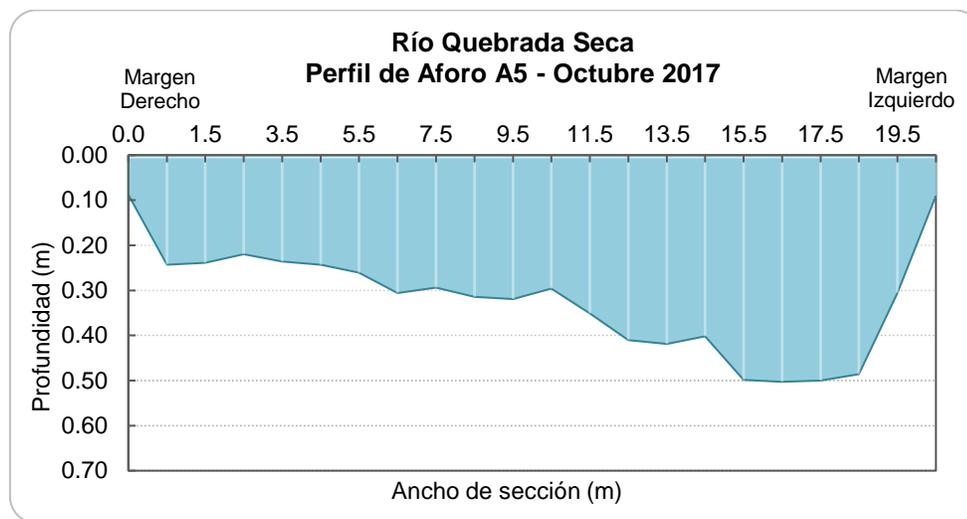


Anexo 2.8 Sección de aforo río El Portillo, parte baja, octubre 2017

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León



Anexo 2.9 Sección de aforo río Quebrada Seca, abril 2017



Anexo 2.10 Sección de aforo río Quebrada Seca, octubre 2017

Anexo III. Inventario de fuentes subterráneas

Anexo 3.1 Inventario de pozos perforados, abril y octubre de 2013

Código	Localización	Este	Norte	Propietario	Elev. (msnm)	Prof. (m)	Uso	Ø (Pulg.)
PP1	Escuela El Guacucal	551949	1415341	Escuela	182	48.78	Sin Uso	4
PP2	El Guacucal	551817	1415082	Comunal	182	36.58	P	4
PP3	San José - Fca. El Cacao	553839	1418672	Comunal	194	54.37	P	10
PP4	Sabana Grande	555839	1417288	Comunal	213	59.70	P	10
PP5	La Ceiba	554217	1415090	Comunal	241	45.73	PD	4
PP6	Las Parras	552978	1419669	Anacelia Rivas	185	-	Sin Uso	4
PP7	Coop. Ismael Castillo	555829	1419189	Comunal	243	27.43	PD	4
PP8	San Ramón	551960	1420980	Comunal	204	36.58	Sin Uso	6
PP9	Escuela El Guasimo	554381	1420888	La Escuela	244	36.58	Escolar	4
PP10	El Almendro	555041	1420530	Comunal	228	24.39	PD	4
PP11	La Suiza	549945	1422684	Comunal	155	45.05	PD	4
PP12	Los Tololos	548760	1420395	Comunal	156	54.88	PD	4
PP13	La Fca. San Nicolas	550158	1419534	Comunal	164	54.88	PD	6
PP14	San Nicolas	550881	1418639	Comunal	169	54.88	PD	4
PP15	Frente a Apangare	548753	1424077	ENACAL	156	56.40	Sin Uso	6
PP16	Quebrada Seca, El Sauce	547441	1423053	ENACAL	145	45.73	P	10
PP17	El Yugo, Quebrada Seca	546950	1423165	ENACAL	140	48.78	P	10
PP18	La Palomera, Yugo Quebrado	546356	1422845	ENACAL	146	48.78	P	10
PP19	Armenia	546706	1421010	Coop. Luis Velásquez	148	54.59	Sin Uso	12
PP20	Santa Bárbara	543978	1422638	Comunal	140	45.73	PD	4
PP21	Comunidad Agua Fria	539959	1420453	Comunal	159	27.43	PD	4
PP22	El Pilón	540974	1422364	Comunal	138	48.78	PD	4
PP23	Escuela Los Limones	547696	1427189	La Escuela	157	42.68	Escolar	4

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Código	Localización	Este	Norte	Propietario	Elev. (msnm)	Prof. (m)	Uso	Ø (Pulg.)
PP24	Escuela El Chaparral	547471	1427805	La Escuela	154	42.68	Escolar	4
PP25	Escuela La Palma	545970	1429216	La Escuela	160	45.73	Escolar	4
PP26	Las Pilas	546047	1431906	Comunal	194	24.38	PD	10
PP27	La Esperanza	544047	1427520	---	140	75.30	Sin Uso	2
PP28	La Laguneta, Eduardo Contreras	542440	1428239	Comunal	130	28.96	P	4
PP29	Hda. Las Palmitas	540910	1425709	Dr. Pio Palacios	125	59.35	Sin Uso	2
PP30	Los Loros Centro	539738	1432391	Comunal	127	45.73	PD	4
PP32	Arlen Súa	248366	1423746	ENACAL	151	60.97	P	10

P: Potable, D: Doméstico

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 3.2 Inventario de pozos excavados, abril y octubre de 2013

Tipo	Localización	Este	Norte	Propietario	Elev. (msnm)	Prof_(m)	Uso	Ø (m)
PE1	San José	552425	1418154	Justino Membreño	177	13.58	G	1.10
PE2	Sabana Grande	555629	1417425	Hermanos Icavalzeta	214	11.17	Sin uso	1.35
PE3	Sabana Grande	555272	1416306	Isabel Rodríguez	221	10.13	PD	1.30
PE4	El Borbollón	556695	1418494	Comunal	263	14.67	PD	1.15
PE5	Los Guasimo	553302	1420794	Comunal	227	4.43	D	1.25
PE6	Escuela La Reforma	549905	1421267	La Escuela	161	10.67	Escolar	1.15
PE7	Rochester - El Sauce	550353	1425230	Roberto Sánchez	177	15.60	D	1.35
PE8	El Salitre	549796	1427067	Enrique López	178	14.30	PDG	1.35
PE9	Fca. Los Charcos -El Salitre	551333	1427386	Yilver Corrales Castillo	227	15.27	PDG	1.35
PE10	El Panamá	551813	1430263	Holman Corrales	462	5.40	PD	1.06
PE11	Correviento	551878	1431264	Reynaldo Velasque	410	6.02	PD	1.20
PE12	Finca El Chingaste	546707	1422785	Ramón Games Rivera	148	13.25	G	1.10
PE13	Armenia	546743	1421121	Comunal	145	9.82	PD	1.20
PE14	Santa Bárbara	544661	1421143	Comunal, Emilia Calderón	143	12.50	PD	1.20
PE15	Cmca. La Carreta	545163	1419613	Ervin J. Bucardo	175	7.91	PDG	
PE16	Río El Portillo	541977	1421972	Isidro Aguirre	128	8.30	PD	1.20
PE17	Cmca. Agua Fria	541178	1419787	Comunal, Camilo Rivera	146	7.67	PD	1.15
PE18	Fca. Las Delicias, Cma. Agua Fría	541215	1418121	Domingo Perez Parajón	168	10.56	PDG	1.35
PE19	Tres puertas	541194	1423537	Pablo Reyes Gutierrez	128	10.58	PD	0.73
PE20	Rancho Lisseth	547388	1424748	Jaime Manga Corrales	145	10.92	PD	1.45
PE21	Los Panales Nº 2	544586	1424817	Comunal	134	7.36	PD	1.15

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Tipo	Localización	Este	Norte	Propietario	Elev. (msnm)	Prof_(m)	Uso	Ø (m)
PE22	Fca. Los Placeres	546006	1426362	Mafaldo Castillo	144	15.07	PDG	0.87
PE23	Los Limones	547876	1426174	Renier Baquedano M.	151	12.22	PD	0.90
PE24	La Palma	546396	1430542	Comunal	172	10.97	PD	1.30
PE25	Puente Ocho	546258	1433359	Comunal	203	8.68	PD	1.25
PE26	El Bejuco	545997	1434829	Rando López	225	7.57	G	1.30
PE27	Hato Viejo	540821	1427421	Fanor Narváez	122	5.35	PD	1.10
PE28	Eduardo Contreras	542447	1428053	Comunal	130	11.13	PD	1.16
PE29	La Casa del Cinco	541286	1428835	Comunal	120	6.84	PD	1.35
PE30	Hda. San José	544478	1429508	Tomas Pastora	150	4.29	PDG	0.92
PE31	Hato Nuevo	542460	1429952	Comunal	132	20.16	D	1.25
PE32	El Limón Berbería, Los Loros	540898	1431127	Comunal	125	16.64	PD	1.05
PE33	Escuela El Papalón	542213	1432151	La Escuela	174	-	Escolar	1.00
PE34	Los Loros Centro	539907	1432203	Eufemia Calderón	121	12.85	PD	1.00
PE35	Escuela Los Loros	540330	1433038	La Escuela	133	-	Escolar	1.40
PE36	Escuela Los Encuentros	537840	1433583	La Escuela	129	-	Escolar	1.40
PE37	Los Encuentros	537572	1433399	Rosibel Moreno Martínez	107	9.22	P	1.22

P: Potable, D: Doméstico, G: Ganadero

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en
la cuenca El Sauce, León

Anexo IV. Medio hidrogeológico

Anexo 4.1 Litología de capa permeable de pozos perforados

Código*	Este	Norte	Estrato permeable (m)	Litología de capa permeable	Prof. del pozo (m)
LPP1	550507	1424552	26.22	Arcilla, arena, roca meteorizada	36.59
LPP2	550157	1424252	39.63	Arena gruesa, roca meteorizada	48.78
LPP3	549907	1424252	13.41	Arena con limo y arcilla	68.29
LPP4	549207	1424452	28.05	Poca arena, arcilla	50.30
LPP5	548807	1424152	11.43	Arena de gruesa a media	17.07
LPP6	549007	1424202	36.58	Aluvial y roca meteorizada	36.59
LPP7	548857	1424102	11.43	Arena con limo y poca arcilla	16.46
LPP8	548907	1424302	16.77	Aluvial, roca meteorizada	16.77
LPP9	549057	1424302	> 16.46	No toco basamento a los 16.46 m, roca meteorizada	16.46
LPP10	548457	1421752	> 39.64	No toco basamento a los 39.64 m, capa aluvial	39.63
LPP11	549147	1424542	38.41	Arena con arcilla, arena fina, roca meteorizada	40.55
LPP12	548557	1424902	32.01	Aluvial	50.30
LPP13	548727	1424152	15.24	Aluvial	70.73
LPP14	548777	1424152	12.96	Aluvial	32.01
LPP15	548747	1424162	12.96	Aluvial	21.34
LPP16	548717	1424162	12.20	Aluvial	19.51
LPP17	547507	1423102	41.16	Arena, grava y bolones	45.73
PP14	550881	1418639	> 18.30	Capa bolones, limo, roca cuarzosa con poca arena fina	54.88
PP28	542440	1428239	> 28.96	No toco basamento a los 28.96 m, arcilla, limo, arena y aglomerados	28.96

Fuente: Tomado de la base de datos de la Dirección de Hidrogeología del INETER

*Los pozos desde LPP1 hasta LPP17, formaron parte de la red de ENACAL hace décadas, los cuales a la fecha ya no permanecen activos. En cambio, el PP14 y PP28, son parte de la red de pozos monitores establecido en el proyecto de investigación.

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en
la cuenca El Sauce, León

Anexo 4.2 Espesor permeable de los sedimentos, obtenidos a través de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) realizado por INETER, 2008

ID	SEV	Este	Norte	Elev. Terreno (msnm)	Espesor de capa permeable (m)	Elev. Basamento (msnm)
1	S01	551890	1420759	198	0	198
2	S02	551687	1420382	182	0	182
3	S03	551420	1420130	184	0	184
4	S04	551181	1419812	178	52	126
5	S05	550924	1419779	175	44	131
6	S06	550626	1419679	172	21	151
7	S07	550456	1419582	168	8	160
8	S08	550159	1419171	165	30	135
9	S09	548243	1419982	152	16	136
10	S10	549229	1420452	160	0	160
11	S11	549517	1420872	160	25	135
12	S12	550406	1421482	167	0	167
13	S13	551373	1422022	185	0	185
14	S14	546769	1420636	148	0	148
15	S15	546341	1419990	157	0	157
16	S16	547492	1420847	144	8	136
17	S17	548602	1421851	151	23	128
18	S18	549362	1422560	153	27	126
19	S19	549899	1423294	158	20	138
20	S20	550740	1423856	176	0	176
21	S21	551135	1424162	185	0	185
22	S22	549625	1425005	159	34	125
23	S23	549362	1424700	169	34	135
24	S24	548952	1424205	158	36	122
25	S25	548248	1423772	153	37	116
26	S26	548781	1424060	156	36	120
27	S27	544856	1420717	149	12	137
28	S28	544964	1421178	145	23	122
29	S29	544993	1421436	143	23	120
30	S30	546042	1421755	140	42	98
31	S31	546248	1421980	141	47	94
32	S32	546470	1422131	142	52	90
33	S33	546547	1422462	142	62	80
34	S34	546711	1422564	141	60	81
35	S35	547000	1422742	140	45	95

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en
la cuenca El Sauce, León

ID	SEV	Este	Norte	Elev. Terreno (msnm)	Espesor de capa permeable (m)	Elev. Basamento (msnm)
36	S36	547309	1422894	141	16	125
37	S37	547376	1423135	145	24	121
38	S38	547553	1423273	148	24	124
39	S39	549220	1426500	177	55	122
40	S40	547900	1425430	155	40	115
41	S41	545670	1423990	138	26	112
42	S42	543410	1422390	136	19	117
43	S43	541140	1420400	139	13	126
44	S44	541420	1422540	129	21	108
45	S45	547470	1427400	157	21	136
46	S46	546010	1426430	146	52	94
47	S47	544550	1425350	130	21	109
48	S48	543500	1424400	133	35	98
49	S49	545790	1428350	158	14	144
50	S50	544460	1427560	143	57	86
51	S51	543090	1426660	129	33	96
52	S52	541280	1427610	122	34	88
53	S53	540400	1424550	129	48	81
54	S54	541460	1425530	121	53	68
55	S55	539900	1426400	133	25	108
56	S56	542480	1428400	118	30	88
57	S57	539880	1431800	116	3	113
58	S58	541150	1431100	129	5	124
59	S59	540200	1429200	124	0	124
60	S60	541300	1429790	122	30	92
61	SS1	542580	1423620	133	28	105
62	SS2	544960	1425580	132	25	107
63	SS3	545940	1426360	147	51	96
64	SS4	542350	1426180	124	89	35
65	SS5	544800	1427790	145	53	92
66	SS6	542390	1428130	124	42	82
67	SS7	546520	1424610	139	27	112
68	SS8	548680	1421950	153	23	130

Fuente: INETER, 2008

Anexo V. Infiltración y recarga natural

Anexo 5.1 Datos velocidad de infiltración cuasi-constante, obtenidas a través del método de Doble anillos, realizadas en marzo de 2014

ID	Localización	Este	Norte	Elev. (msnm)	fc (mm/h)	Textura del Suelo	Acuífero
1	Sabana Grande No. 2	555327	1416252	228	8.86	Franco arcilloso	Poroso
2	San Nicolás	551257	1418147	175	7.34	Arcillo limoso	Poroso
3	Esquipulas	548318	1421468	156	17.74	Franco limoso	Poroso
4	Santa Sara	548421	1424811	161	22.96	Franco	Poroso
5	Gallo Solo	545345	1427909	148	19.37	Franco limoso	Poroso
6	Hato Nuevo	542384	1429956	134	14.93	Franco limoso	Poroso
7	Santa Barbará	543425	1422544	139	5.31	Arcilloso	Poroso
8	La Palmita	540854	1425353	129	4.77	Arcilloso	Poroso
9	Los Rascaderos	539108	1427696	173	10.83	Arcillo arenoso	Fracturado granodiorítico
10	La Herradura	539778	1432408	130	12.85	Arcillo arenoso	Fracturado granodiorítico
11	San José	546536	1433478	226	5.31	Franco arcilloso	Fracturado andesítico - dacítico
12	El Panamá	551730	1430533	500	8.55	Franco arcilloso	Fracturado dacítico
13	El Guayabo	555941	1422533	403	11.93	Franco limoso	Fracturado dacítico
14	Mercedes Centro	557302	1419844	334	7.12	Franco arcilloso	Fracturado dacítico
15	La Carreta	545312	1419098	198	6.23	Arcillo limoso	Fracturado ignimbrítico - dacítico
16	El Pílon	539857	1420746	163	5.76	Arcillo limoso	Fracturado andesítico

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 5.2 Parámetros de entrada para el balance hídrico del suelo y recargas potenciales, metodología Schosinsky, G. 2007

Zona	ID	Textura	fc (mm/d)	K fc (0.01%)	Kp (0.01%)	Kv (0.01%)	Ci (0.01%)	CC (%)	PM (%)	DS (g/cm ³)	PR (mm)	P (mm/a)	Pi (mm/a)	PI (%)	ETP (mm/a)	RP (mm/a)	RP (%)
Zona 1	11	Franco arcilloso	42.49	0.27	0.10	0.21	0.58	27	13	1.33	300	1804.3	917.3	50.84	1647.07	177.43	9.83
	12	Franco arcilloso	68.37	0.39	0.06	0.21	0.66	27	13	1.33	300	1804.3	1048.3	58.10	1647.07	255.54	14.16
	13	Franco limoso	95.47	0.48	0.06	0.21	0.75	25	12	1.37	300	1804.3	1182.3	65.53	1647.07	345.43	19.15
	14	Franco arcilloso	56.95	0.35	0.10	0.21	0.66	27	13	1.33	300	1804.3	1037.2	57.48	1647.07	248.42	13.77
Zona 2	1	Franco arcilloso	70.87	0.40	0.15	0.21	0.76	27	13	1.33	400	1627.6	1085.4	66.69	1647.07	230.54	14.16
	2	Arcillo limoso	58.69	0.36	0.18	0.21	0.75	34	16	1.28	400	1627.6	1059.1	65.07	1647.07	211.62	13.00
Zona 3	15	Arcillo limoso	49.85	0.31	0.10	0.21	0.62	34	16	1.28	300	1721.1	937.1	54.45	1647.07	176.69	10.27
	16	Arcillo limoso	46.11	0.29	0.10	0.21	0.60	34	16	1.28	300	1721.1	906.6	52.67	1647.07	163.28	9.49
	9	Arcillo arenoso	86.65	0.45	0.10	0.18	0.73	31	15	1.30	300	1882.1	1210.5	64.31	1647.07	320.04	17.00
Zona 4	3	Franco limoso	141.94	0.58	0.18	0.15	0.91	25	12	1.37	400	1627.6	1290.8	79.31	1647.07	385.29	23.67
	4	Franco	183.71	0.64	0.18	0.15	0.97	22	10	1.40	400	1627.6	1379.5	84.76	1647.07	449.96	27.64
	5	Franco limoso	154.96	0.60	0.18	0.15	0.93	25	12	1.37	400	2129.3	1734.1	81.44	1647.07	757.16	35.56
	6	Franco limoso	119.46	0.54	0.18	0.18	0.90	25	12	1.37	300	1882.1	1475.1	78.38	1647.07	528.67	28.09
Zona 5	7	Arcilloso	42.46	0.27	0.30	0.18	0.75	36	17	1.25	400	1721.1	1130.0	65.65	1647.07	258.73	15.03
	8	Arcilloso	38.18	0.24	0.30	0.18	0.72	36	17	1.25	400	2129.3	1349.7	63.39	1647.07	430.44	20.22
Zona 6	9	Arcillo arenoso	86.65	0.45	0.10	0.18	0.73	31	15	1.30	300	1882.1	1210.5	64.31	1647.07	320.04	17.00
	10	Arcillo arenoso	102.78	0.50	0.10	0.18	0.78	31	15	1.30	300	1882.1	1281.4	68.09	1647.07	365.55	19.42

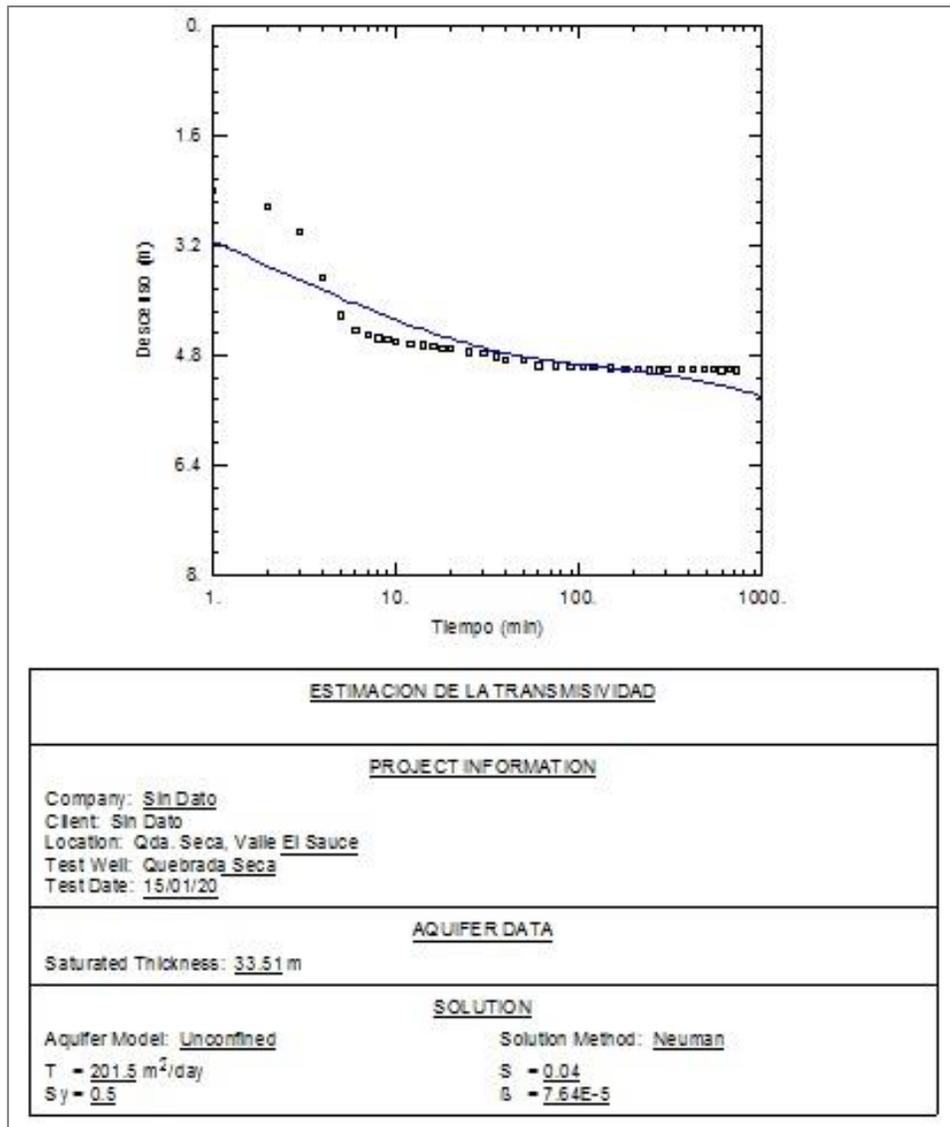
Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 5.3 Resultados del balance hídrico del suelo, metodología Schosinsky, G. 2007

Zona Recarga	Textura	K _{fc} Prom. (mm/d)	P (mm/a)	PI (mm/a)	ETP (mm/a)	Formación litológica	Litología	RP. Prom. (mm)	RP (%)	RP Prom. por Text.	Porc. Prom. RP	Precipit. media
Zona 1	Franco arcilloso	55.94	1804.3	1000.91	1647.1	Grupo Coyol Inferior	Dacitas, andesitas	227.13	12.59	286.28	15.87	1804.3
	Franco limoso	95.47	1804.3	1182.28	1647.1	Grupo Coyol Inferior	Dacitas, andesitas	345.43	19.15			
Zona 2	Franco arcilloso	70.87	1627.6	1085.44	1647.1	Cuaternario Indiferenciado	Arcillas, limos, arenas, andesitas	230.54	14.16	221.08	13.58	1627.6
	Arcillo limoso	58.69	1627.6	1059.15	1647.1	Cuaternario Indiferenciado	Arcillas, limos, arenas, andesitas	211.62	13.00			
Zona 3	Arcillo limoso	47.98	1721.1	921.84	1647.1	Grupo Coyol Infeior, Grupo Coyol Superior	Ignimbritas dacíticas, lavas andesíticas	169.98	9.88	245.01	13.44	1721.1
	Arcillo arenoso	102.78	1721.1	1281.43	1647.1	Intrusivo ácido, Grupo Coyol Superior	Granodioritas, Ignimbritas dacíticas	320.04	17.00			
Zona 4	Franco limoso	138.79	1879.7	1500.00	1647.1	Cuaternario Indiferenciado	Arcillas, limos, arenas, bolones	557.04	29.11	503.50	28.38	2004.5
	Franco	183.71	2129.3	1379.54	1647.1	Cuaternario Indiferenciado	Arcillas, limos, arenas, bolones	449.96	27.64			
Zona 5	Arcilloso	40.32	1925.2	1239.85	1647.1	Grupo Coyol Inferior, Grupo Coyol Superior	Arcillas, limos	344.59	17.62	344.59	17.62	1925.2
Zona 6	Arcillo arenoso	94.71	1882.1	1245.95	1647.1	Intrusivo ácido, Grupo Coyol Superior	Granodioritas, Ignimbritas dacíticas	342.80	18.21	342.80	18.21	1882.1

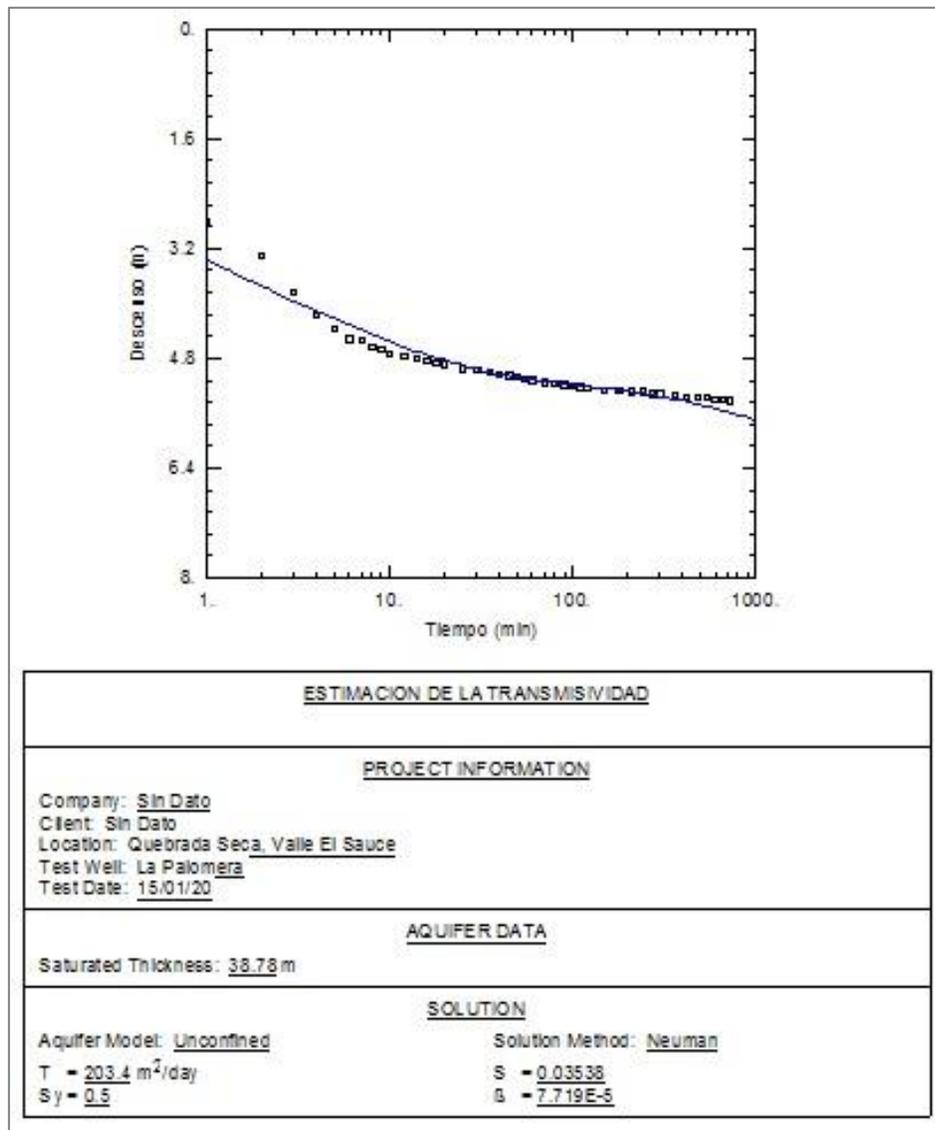
Anexo VI. Estimación de la transmisividad

Anexo 6.1 Estimación de la Transmisividad (T) para pozo PP17 (Quebrada Seca) empleando el método de solución de Neuman



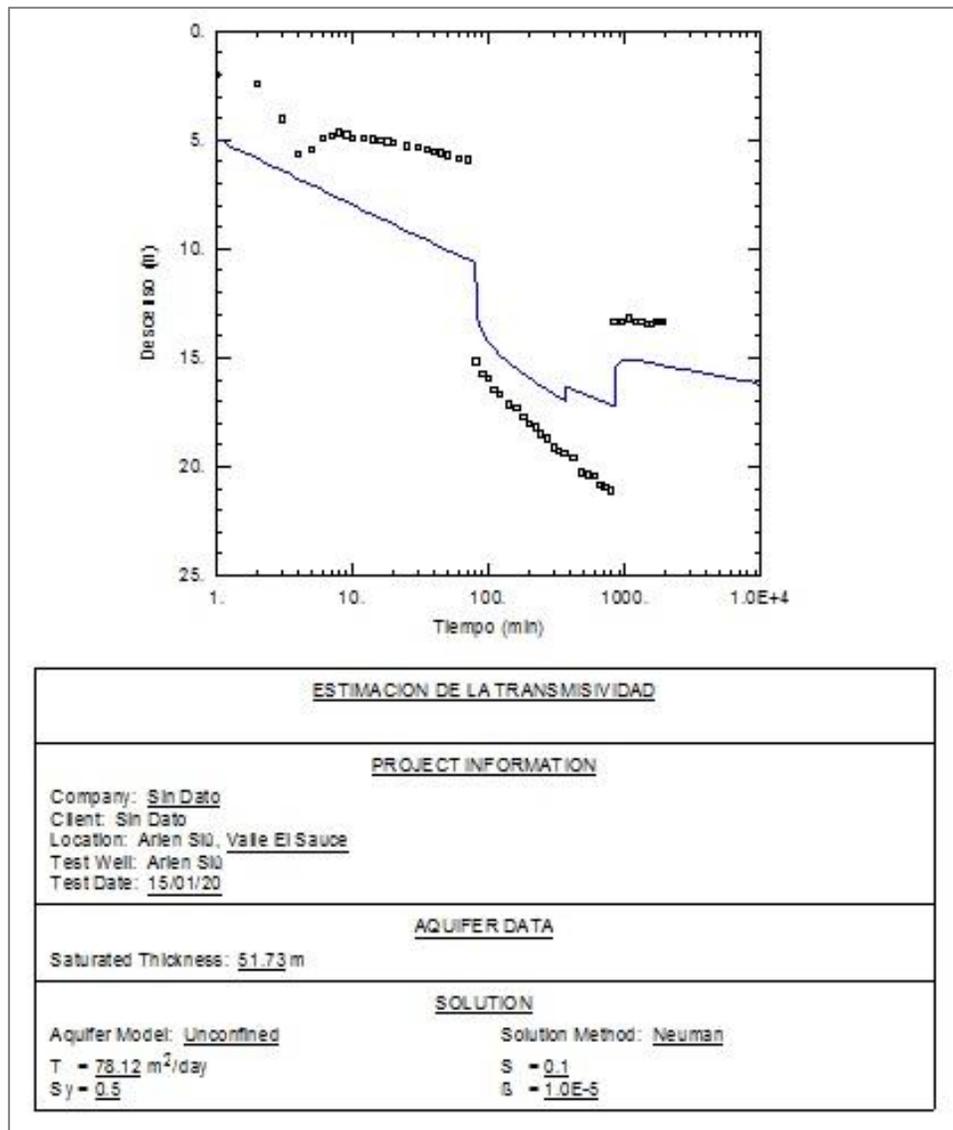
Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 6.2 Estimación de la Transmisividad (T) para pozo PP18 (La Palomera) empleando el método de solución de Neuman



Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 6.3 Estimación de la Transmisividad (T) para pozo PP32 (Arlen Siu) empleando el método de solución de Neuman



Anexo VII. Levantamiento de niveles estáticos y dinámicos

Anexo 7.1 Registro de niveles estáticos en acuífero poroso, abril y octubre de los años 2013 y 2017

Código	Localización	NEA (m)						NEA (msnm)	
		abr-13	oct-13	Anual 2013	abr-17	oct -17	Anual 2017	Anual 2013	Anual 2017
PP11	La Suiza	4.89	2.43	3.66	5.63	2.79	4.21	151.34	150.79
PP12	Los Tololos	6.36	5.04	5.70	7.32	5.57	6.45	149.64	150.96
PP13	La Fca. San Nicolás	5.46	2.59	4.03	6.18	2.87	4.53	158.54	161.41
PP14	San Nicolás	6.11	3.75	4.93	6.28	4.24	5.26	162.89	165.25
PP15	Frente a Apangare	5.42	2.14	3.78	6.32	2.46	4.39	150.58	153.86
PP19	Armenia	6.78	4.72	5.75	7.42	4.94	6.18	141.22	143.28
PP23	Escuela Los Limones	7.63	2.05	4.84	8.30	2.44	5.37	149.37	154.95
PZ27	La Esperanza	12.59	11.83	12.21	13.51	12.27	12.89	127.41	128.17
PZ29	Hda. Las Palmitas	8.63	6.88	7.76	9.24	7.36	8.30	116.37	118.12
PE3	Sabana Grande	4.10	2.35	3.23	4.48	2.66	3.57	216.90	218.65
PE6	Escuela La Reforma	6.52	2.57	4.55	7.22	2.86	5.04	154.48	158.43
PE12	Finca El Chingaste	11.30	9.98	10.64	12.06	10.23	11.15	136.70	138.02
PE13	Armenia	6.47	4.73	5.60	7.12	5.01	6.07	138.53	140.27
PE14	Santa Bárbara	9.03	2.51	5.77	9.87	2.84	6.35	133.97	140.49
PE16	Río El Portillo	5.72	4.33	5.03	6.36	4.45	5.41	122.28	123.67
PE19	Tres puertas	7.72	5.76	6.74	8.43	6.28	7.36	120.28	122.24
PE20	Rancho Lisseth	6.19	2.79	4.49	7.30	2.99	5.14	138.81	142.21
PE21	Los Panales N° 2	5.54	5.26	5.40	6.13	5.62	5.88	128.46	SD
PE22	Fca. Los Placeres	11.42	9.24	10.33	12.16	9.83	11.00	132.58	134.76
PE23	Los Limones	8.00	6.57	7.29	8.72	7.03	7.88	143.00	144.43
PE27	Hato Viejo	3.58	2.31	2.95	4.15	2.66	3.41	118.42	119.69
PE28	Eduardo Contreras	13.65	10.91	12.28	14.34	11.33	12.84	116.35	119.09
PE29	La Casa del Cinco	10.04	5.22	7.63	10.75	5.67	8.21	109.96	114.78

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

PE32	El Limón Berbería, Los Loros	11.72	1.51	6.62	12.23	1.78	7.01	113.28	123.49
PP1	Escuela El Guacucal	35.27	34.24	34.76	SD	SD		146.73	147.76
PP3	San José - Fca. El Cacao	19.69	13.23	16.46	20.05	13.88	16.97	174.31	180.77
PP4	Sabana Grande	0.55	0.00	0.28	0.94	0.58	0.76	212.45	213.00
PP5	La Ceiba	18.50	17.49	18.00	19.06	18.56	18.81	222.50	223.51
PP6	Las Parras	5.90	4.13	5.02	6.27	4.59	5.43	179.10	180.87
PP7	Coop..Ismael Castillo	8.20	5.61	6.91	8.86	6.13	7.49	234.80	237.39
PP20	Santa Bárbara	18.03	13.29	15.66	18.64	13.67	16.16	121.97	126.71
PP21	Comunidad Agua Fría	6.70	3.49	5.10	7.50	3.84	5.67	152.30	155.51
PP22	El Pilón	7.76	6.52	7.14	8.73	7.16	7.95	130.24	131.48
PP24	Escuela El Chaparral	8.46	2.34	5.40	9.14	2.78	5.96	145.54	151.66
PP25	Escuela La Palma	16.18	12.70	14.44	17.14	13.18	15.16	143.82	147.30
PP26	Las Pilas	13.18	0.80	6.99	13.86	1.07	7.47	180.82	193.20
PP30	Los Loros Centro	SD	2.79	2.79	7.23	3.02	5.13	SD	124.21
PE1	San José	6.10	1.23	3.67	6.59	1.71	4.15	170.90	175.77
PE2	Sabana Grande	3.24	1.40	2.32	3.64	2.01	2.83	210.76	212.60
PE7	Rochester	11.72	7.83	9.78	12.53	8.28	10.41	165.28	169.17
PE8	El Salitre	11.77	6.31	9.04	12.65	6.81	9.73	166.23	171.69
PE15	Cmca. La Carreta	6.52	4.97	5.75	7.39	5.53	6.46	168.48	SD
PE17	Cmca. Agua Fria	3.68	2.41	3.05	4.42	2.84	3.63	142.32	143.59
PE24	La Palma	7.70	5.56	6.63	8.62	6.13	7.38	164.30	166.44
PE25	Puente Ocho	6.20	4.28	5.24	7.07	4.58	5.82	196.80	198.72
PE30	Hda. San José	1.85	1.14	1.50	2.37	1.72	2.05	148.15	148.86
PE31	Hato Nuevo	6.79	1.21	4.00	7.42	1.54	4.48	125.21	130.79
PE34	Los Loros Centro	8.88	3.05	5.97	9.46	3.36	6.41	112.12	117.95
PE35	Escuela Los Loros	4.48	2.19	3.34	5.03	2.37	3.70	128.52	130.81

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 7.2 Registro de niveles estáticos en acuífero fracturado, abril y octubre de los años 2013 y 2017

Código	Localización	NEA (m)				NEA (msnm)			
		abr-13	oct-13	Anual 2013	oct-13	abr-13	Anual 2017	Anual 2013	Anual 2017
PP8	San Ramón	12.76	8.88	10.82	13.92	9.50	11.71	191.24	195.12
PP9	Escuela El Guasimo	9.09	5.49	7.29	9.82	6.02	7.92	234.91	238.51
PP10	El Almendro	8.63	3.83	6.23	9.47	4.32	6.90	219.37	224.17
PE4	El Borbollón	2.76	0.63	1.70	3.34	0.96	2.15	260.24	262.37
PE5	Los Guasimo	2.83	0.23	1.53	3.78	0.52	2.15	224.17	226.77
PE9	Fca. Los Charcos -El Salitre	13.28	11.33	12.31	14.04	11.86	12.95	213.72	215.67
PE10	El Panamá	4.29	1.02	2.66	5.15	1.14	3.14	457.71	460.98
PE11	Correviento	4.25	0.80	2.53	4.84	0.99	2.92	405.75	409.20
PE18	Fca. Las Delicias, Cmca. Agua Fría	6.10	2.53	4.32	7.08	3.00	5.04	161.90	165.47
PE26	El Bejuco	4.96	1.30	3.13	5.72	1.72	3.72	220.04	223.70
PE33	Escuela El Papalón	16.36	8.30	12.33	17.23	8.71	12.97	157.64	165.70
PE36	Escuela Los Encuentros	4.33	0.57	2.45	5.14	1.04	3.09	124.67	128.43
PE37	Los Encuentros	7.78	6.31	7.05	8.38	6.70	7.54	99.22	100.69

Anexo 7.3 Registro de niveles dinámicos en acuífero poroso, abril y octubre de los años 2013 y 2017

Código	Localización	Nivel Dinámico (m)			
		abr-13	oct-13	abr-17	oct -17
PPE16	Quebrada Seca, El Sauce	22.51	12.76	25.08	14.86
PPE17	El Yugo, Quebrada Seca	13.66	12.26	15.63	-
PPE18	La Palomera, Yugo Quebrado	13.56	11.86	17.63	-

Anexo VIII. Aprovechamiento del recurso

Anexo 8.1 Volúmenes de aprovechamiento de agua subterránea, a través de pozos de bombeo (pozos de ENACAL y MABE Comunales)

Código	Localización	Coordenadas		Caudales de bombeo		Horas de bombeo al día		Extracción		Extracc. Anual. (Mm ³ /a)
		Este	Norte	Ep. Seca (m ³ /h)	E. Lluv. (m ³ /h)	Ep. Seca (h)	E. Lluv. (h)	Ep. Seca (m ³ /d)	E. Lluv. (m ³ /d)	
PP2	El Guacucal	551817	1415082	5.22	5.22	12	8	62.64	41.76	0.019
PP3	San José	553839	1418672	10.54	10.54	15	12	158.10	126.48	0.052
PP4	Sabana Grande	555839	1417288	8.52	8.52	8	7	68.16	59.64	0.023
PP9	El Guásimo	554381	1420888	3.00	3.00	7	6	21.00	18.00	0.007
PP32	Arlen Siu (ENACAL)	548366	1423746	48.00	50.00	24	18	1152.00	900.00	0.378
PP16	Quebrada Seca (ENACAL)	547441	1423053	28.00	32.00	24	18	672.00	576.00	0.229
PP17	El Yugo, Quebrada Seca (ENACAL)	546950	1423165	23.00	24.00	24	18	552.00	432.00	0.181
PP18	La Palomera, Yugo Quebrado (ENACAL)	546356	1422845	26.00	28.00	24	18	624.00	504.00	0.207
PP22	El Pilón	540974	1422364	6.00	6.00	7	6	42.00	36.00	0.001
PP26	Las Pilas	546047	1431906	5.60	5.60	12	8	67.20	44.80	0.002
PP28	La Laguneta	542440	1428239	5.70	5.70	6	4	34.20	22.80	0.001
Total								3453.30	2761.48	1.102

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 8.2 Volúmenes de aprovechamiento de agua, de comunidades que no cuenta con una red de abastecimiento de agua (población dispersa)

No	Comarca	Poblac. 2017	Tasa de Crecimiento	Poblac. 2018 en Cuenca	Dotación (lppd)	Consumo Total (Miles m ³ /a)	Consumo Agua Superf. (Miles m ³ /a)	Consumo Agua Subt. (Miles m ³ /a)
1	Sabana Grande	1,390	0.7	1101	75	12.211	1.831	10.379
2	Las Mercedes	1,155	0.7	1163	75	14.790	4.057	10.733
3	Ocotal	1,291	0.7	780	75	9.338	2.127	7.211
4	El Salitre	1,270	0.7	1136	75	28.405	8.522	19.884
5	La Palma	1,675	0.7	1686	75	40.341	10.681	29.660
6	Río Grande	1,790	0.7	1703	75	22.696	5.038	17.658
7	Los Loros	1,023	0.7	1030	75	28.209	6.931	21.277
8	Santa Lucía	1,757	0.7	395	75	2.163	0.000	2.163
9	Los Tololos	2,348	0.7	2365	75	39.132	5.037	34.096
10	Santa Bárbara	734	0.7	739	75	18.802	3.971	14.831
11	Agua Fría/Pilón	1,972	0.7	1078	75	14.772	3.773	10.999
12	Los Panales	1,987	0.7	3282	75	76.099	7.138	68.962
Sub Total Rural		23,501	0.7	16,458		306.958	59.105	247.853

Fuente: Censo Municipal (Alcaldía El Sauce, 2007). Población Base 2007 para la proyección poblacional de la Comarca al año 2017

Datos INIDE 2008: tasas de Crecimiento Poblacional del municipio El Sauce, periodo 2005-2020

Población 2018: estimada a partir del método geométrico

Anexo 8.3 Descarga de agua subterránea a través de manantiales establecidos como Mini Acueducto por Gravedad (MAG)

Código	Localización	Coordenadas		Elev. (msnm)	Caudales		Descarga		Descarga. Anual. (Mm ³ /a)
		Este	Norte		Ep. Seca (m ³ /h)	E. Lluv. (m ³ /h)	Ep. Seca (m ³ /d)	E. Lluv. (m ³ /d)	
MAG1	Palmar Sur	558984	1416026	333	2.271	2.725	54.50	65.40	0.022
MAG2	El Borbollón	557975	1420949	511	4.996	5.905	119.90	141.72	0.047
MAG3	El Guayabo	557828	1423585	624	1.817	2.725	43.61	65.40	0.020
MAG4	El Guayabo	557926	1423653	702	1.363	2.271	32.71	54.50	0.016
MAG5	Cerro Colorado	557103	1425278	860	2.725	3.634	65.40	87.22	0.028
MAG6	Cerro Colorado	556954	1425199	825	2.271	2.725	54.50	65.40	0.022
MAG7	Buena Vista	555450	1422690	362	2.271	2.725	54.50	65.40	0.022
MAG8	Corre Viento	551377	1431513	400	2.271	2.725	54.50	65.40	0.022
MAG9	Las Limas	551348	1428882	316	1.817	2.271	43.61	54.50	0.018
MAG10	Las Cañas	549327	1430518	404	2.725	3.407	65.40	81.77	0.027
MAG11	San Gayetano	548633	1428876	199	1.363	2.271	32.71	54.50	0.016
MAG12	Agua Fría	541905	1419765	316	1.817	2.271	43.61	54.50	0.018
Total							664.97	855.72	0.275

Anexo 8.4 Volúmenes de aprovechamiento de agua, demandado para la actividad pecuaria

No	Comarca	Ganado Bovino en 2007	Tasa de Reproducción (%)	Ganado Bovino en Cuenca según Comarca	Dotación (lpad)	Consumo Total (Miles m ³ /a)	Consumo Agua Superf. (Miles m ³ /a)	Consumo Agua Subt. (Miles m ³ /a)
1	Sabana Grande	770	4.9	1,303	40	19.027	7.379	11.649
2	Las Mercedes	656	4.9	1,110	40	16.210	6.484	9.726
3	Ocotal	142	4.9	240	40	5.137	2.055	3.082
4	El Salitre	532	4.9	900	40	13.146	5.258	7.888
5	La Palma	800	4.9	1,354	40	19.768	7.275	12.494
6	Río Grande	639	4.9	1,082	40	13.949	4.590	9.359
7	Los Loros	905	4.9	1,532	40	22.363	7.411	14.952
8	Santa Lucía	366	4.9	366	40	9.044	2.713	6.331
9	Los Tololos	1,247	4.9	2,111	40	30.814	11.439	19.376
10	Santa Bárbara	822	4.9	1,391	40	20.312	6.640	13.672
11	Agua Fría/Pilón	907	4.9	1,535	40	19.707	6.889	12.817
12	Los Panales	2,028	4.9	3,432	40	50.113	18.227	31.887
Total Rural en Cuenca		9,814		16,357		239.591	86.359	153.232

Fuente: Ganado bovino Censo Municipal (Alcaldía El Sauce, 2007)

Tasas de reproducción, estimada a partir del método geométrico, con datos de producción del IV Censo Nacional Agropecuario (INIDE & MAGFOR, 2013) y Censo Municipal (Alcaldía El Sauce 2007)

Producción de ganado al 2018: estimada a partir del método geométrico

Anexo 8.5 Volúmenes de aprovechamiento de agua, demandado para la actividad agrícola

Cultivo	Área (ha)	Tipo de riego	Lamina de riego (mm)	Volumen diario (m ³ /d)	Días de riego al mes	Meses de riego al año	Volumen anual (Mm ³ /a)
Permanentes / Anuales	32.68	Gravedad	6	1961.04			0.39
Permanentes / Anuales	34.43	Aspersión	6	2065.58	20	10	0.41
Permanentes / Anuales	10.71	Goteo	6	642.44			0.13
Total	77.82	-	-	4669.06	-		0.93

Fuentes: Áreas y tipo de riego obtenido de IV Censo Nacional Agropecuario, (INIDE & MAGFOR 2013)

Anexo IX. Parámetros físico químicos de campo en agua subterránea

Anexo 9.1. Parámetros físico químicos de campo en el **acuífero poroso**, abril de 2013

Código	Localización	Época seca (abr- 2013)					
		T (°C)	pH (Unid)	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (mg/L)	Sat. OD (%)
PP11	La Suiza	28.30	7.12	288	144.00	5.25	69.20
PP12	Los Tololos	29.60	6.95	261	131.00	3.37	45.80
PP13	La Fca. San Nicolas	28.70	6.71	165	82.30	3.70	51.70
PP14	San Nicolas	29.60	6.70	506	252.00	4.28	60.50
PP16	Quebrada Seca, El Sauce	29.80	6.80	201	100.00	5.27	71.90
PP17	El Yugo, Quebrada Seca	30.50	6.72	200	99.70	4.49	30.00
PP18	La Palomera, Yugo Quebrado	29.90	7.17	231	116.00	7.23	97.30
PP23	Escuela Los Limones	-	-	-	-	-	-
PP28	La Laguneta, Eduardo Contreras	-	-	-	-	-	-
PE3	Sabana Grande	31.5	7.16	651	325	3.05	42.8
PE6	Escuela La Reforma	29.7	6.64	169	85	5.66	74.7
PE13	Armenia	28.7	6.48	283	141	4.35	57.4
PE14	Santa Bárbara	26.7	6.62	213	107	5.42	68.9
PE16	Río El Portillo	27.4	6.83	463	231	3.29	42.8
PE19	Tres puertas	29.7	6.92	578	289	4.15	59.2
PE20	Rancho Lisseth	26.7	6.47	212	106	3.83	47.9
PE21	Los Panales N° 2	29.2	6.77	225	112	5.04	67.00
PE22	Fca. Los Placeres	29.9	6.30	144	72	3.35	45.7
PE23	Los Limones	29.7	6.42	149	75	5.18	70.2
PE27	Hato Viejo	30.0	6.74	330	164	3.86	52.1
PE28	Eduardo Contreras	29.9	6.30	189	94	4.98	67.0

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Código	Localización	Época seca (abr- 2013)					
		T (°C)	pH (Unid)	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (mg/L)	Sat. OD (%)
PE29	La Casa del Cinco	29.1	6.38	184	92	3.35	44.4
PE32	El Limón Berbería, Los Loros	30.7	7.15	142	71	7.49	102.5
PP2	El Guacucal	-	-	-	-	-	-
PP3	San José - Fca. El Cacao	33.7	7.31	315	158.00	5.43	82.50
PP4	Sabana Grande	30.4	7.64	358	177.00	4.90	80.80
PP5	La Ceiba	29.6	6.60	295	147.00	3.57	48.70
PP7	Coop. Ismael Castillo	30.1	6.41	204	103.00	3.59	48.90
PP20	Santa Bárbara	28.2	7.31	652	327.00	3.41	44.50
PP21	Comunidad Agua Fria	28.1	6.99	385	192.00	4.03	52.60
PP22	El Pilon	29.7	7.30	505	253.00	5.59	74.70
PP24	Escuela El Chaparral	30.9	7.00	225	112.00	2.62	36.40
PP25	Escuela La Palma	31.0	7.19	270	135.00	3.19	44.50
PP26	Las Pilas	30.4	7.50	253	126.00	6.52	89.10
PP30	Los Loros Centro	-	-	-	-	-	-
PE1	San José	28.5	6.65	420	211	2.44	24.4
PE7	Rochester - El Sauce	29.8	6.83	230	115	5.15	70.1
PE8	El Salitre	29.3	6.96	271	135	4.40	59.2
PE15	Cmca. La Carreta	27.5	6.57	258	129	4.80	62.1
PE17	Cmca. Agua Fria	27.6	6.86	471	236	2.36	32.3
PE24	La Palma	30.1	6.70	283	141	3.09	42.2
PE25	Puente Ocho	28.5	6.88	278	139	2.73	36.1
PE30	Hda. San José	-	-	-	-	-	-
PE31	Hato Nuevo	29.0	6.70	291	145	7.01	92.5
PE34	Los Loros Centro	29.3	7.05	292	145	5.04	67.9

Anexo 9.2. Parámetros físico químicos de campo en el **acuífero fracturado**, abril de 2013

Código	Localización	Época seca (abr- 2013)					
		T (°C)	pH (Unid)	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (mg/L)	Sat. OD (%)
PP9	Escuela El Guasimo	-	-	-	-	-	-
PP10	El Almendro	29.8	7.06	441	221.00	4.91	67.30
PE4	El Borbollón	31.3	6.56	218	109	2.47	32.4
PE9	Fca. Los Charcos - El Salitre	29.0	6.57	217	108	4.52	65.6
PE10	El Panamá	28.7	6.49	159	79	2.69	37.9
PE11	Correviento	28.4	6.91	201	100	3.82	48.5
PE18	Fca. Las Delicias, Cmca. Agua Fría	28.8	6.47	291	145	4.36	57.8
PE33	Escuela El Papalón	31.2	6.36	344	173	3.56	46.6
PE36	Escuela Los Encuentros	29.6	7.04	198	99	3.92	52.3
PE37	Los Encuentros	30.2	6.37	118	94	5.30	71.3

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Anexo 9.3. Parámetros físico químicos de campo en el **acuífero poroso**, octubre de 2013

Código	Localización	Época lluviosa (oct- 2013)						
		T (°C)	pH (Unid)	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (mg/L)	Sat. OD (%)	Redox (mV)
PP11	La Suiza	27.3	5.74	301.0	150.00	1.13	14.60	-168.60
PP12	Los Tololos	29.7	5.63	250.0	125.00	2.25	26.30	-160.20
PP13	La Fca. San Nicolás	29.0	5.58	166.0	83.00	2.34	29.10	-662.60
PP14	San Nicolás	29.4	5.72	400.0	201.00	2.66	34.10	-769.80
PP16	Quebrada Seca, El Sauce	29.5	5.49	206.0	103.00	4.17	53.90	-134.10
PP17	El Yugo, Quebrada Seca	30.3	5.72	193.8	102.00	4.24	51.70	-138.30
PP18	La Palomera, Yugo Quebrado	26.6	5.61	349.0	125.00	3.95	53.22	-764.30
PP23	Escuela Los Limones	29.3	6.63	531.0	267.00	1.67	21.40	-158.80
PP28	La Laguneta, Eduardo Contreras	28.7	5.10	176.6	88.60	3.43	43.30	-135.50
PE3	Sabana Grande	28.6	5.99	745.0	373.00	1.23	16.00	-202.10
PE6	Escuela La Reforma	28.6	5.55	176.6	88.20	3.35	44.20	-210.40
PE13	Armenia	28.4	5.33	352.0	177.00	2.04	23.90	-179.10
PE14	Santa Bárbara	27.3	5.33	156.4	78.20	1.62	19.60	-193.20
PE16	Río El Portillo	29.5	5.63	771.0	386.00	2.92	39.90	-196.80
PE19	Tres puertas	28.0	5.57	564.0	282.00	1.66	8.50	-219.20
PE20	Rancho Lisseth	29.9	5.75	210.0	105.00	1.44	18.90	-752.00
PE21	Los Panales N° 2	-	-	-	-	-	-	-
PE22	Fca. Los Placeres	29.7	5.59	157.7	78.90	1.77	39.90	-124.00
PE23	Los Limones	29.2	5.59	139.2	69.60	2.98	40.90	-107.20
PE27	Hato Viejo	27.6	5.61	375.0	187.00	2.31	30.90	-149.90
PE28	Eduardo Contreras	29.3	5.66	353.0	176.00	2.79	37.60	-164.80
PE29	La Casa del Cinco	-	-	-	-	-	-	-
PE32	El Limón Berbería, Los Loros	28.7	5.40	142.8	71.60	4.04	25.90	-175.30

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la cuenca El Sauce, León

Código	Localización	Época lluviosa (oct- 2013)						
		T (°C)	pH (Unid)	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (mg/L)	Sat. OD (%)	Redox (mV)
PP2	El Guacucal	29.1	5.89	292.0	146.00	3.88	51.30	-138.50
PP3	San José - Fca. El Cacao	32.9	6.27	435.0	217.00	2.67	36.50	-190.60
PP4	Sabana Grande	29.6	5.28	391.0	196.00	0.84	10.30	-184.70
PP5	La Ceiba	28.8	5.72	312.0	156.00	1.63	21.70	-224.30
PP7	Coop. Ismael Castillo	28.9	4.95	149.6	74.90	1.55	20.70	-150.00
PP20	Santa Bárbara	29.1	5.81	700.0	351.00	1.62	20.90	-213.80
PP21	Comunidad Agua Fría	27.7	5.71	414.0	208.00	2.93	37.40	-151.90
PP22	El Pilón	28.3	5.84	541.0	312.00	4.01	50.20	-143.50
PP24	Escuela El Chaparral	29.8	6.49	307.0	152.00	0.84	11.10	-213.70
PP25	Escuela La Palma	29.8	6.41	291.0	145.00	2.40	27.40	-109.30
PP26	Las Pilas	29.9	5.18	269.0	134.00	3.61	49.70	-122.80
PP30	Los Loros Centro	29.5	5.24	307.0	153.00	1.45	17.70	-165.30
PE1	San José	27.1	5.60	369.0	186.00	0.57	7.40	-182.70
PE7	Rochester - El Sauce	28.0	6.17	796.0	397.00	3.33	43.80	-148.40
PE8	El Salitre	27.9	5.17	412.0	204.00	1.58	20.70	-149.10
PE15	Cmca. La Carreta	-	-	-	-	-	-	-
PE17	Cmca. Agua Fría	27.0	5.60	598.0	299.00	1.74	25.50	-152.80
PE24	La Palma	28.7	6.32	387.0	193.00	2.38	27.90	-46.80
PE25	Puente Ocho	27.3	6.53	505.0	254.00	1.76	21.40	-43.40
PE30	Hda. San José	27.2	5.28	205.0	104.00	1.69	20.60	-162.50
PE31	Hato Nuevo	27.3	5.28	376.0	188.00	2.49	30.90	-169.10
PE34	Los Loros Centro	29.5	5.28	190.1	95.10	2.95	38.80	-143.30

Anexo 9.4 Parámetros físico químicos de campo en el **acuífero fracturado**, octubre de 2013

Código	Localización	Época lluviosa (oct- 2013)						
		T (°C)	pH (Unid)	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (mg/L)	Sat. OD (%)	Redox (mV)
PP9	Escuela El Guasimo	28.0	5.64	234.0	117.00	1.13	10.80	-165.60
PP10	El Almendro	29.2	4.72	475.0	239.00	1.54	20.60	-186.50
PE4	El Borbollón	28.2	5.50	169.2	84.90	1.20	15.70	-317.80
PE9	Fca. Los Charcos - El Salitre	27.5	5.76	315.0	159.00	2.32	3.30	-169.20
PE10	El Panamá	26.2	5.46	308.0	155.00	1.85	24.80	-134.50
PE11	Correviento	25.4	5.65	364.0	132.00	1.40	13.70	-176.40
PE18	Fca. Las Delicias, Cmca. Agua Fría	27.4	5.47	314.0	156.00	2.28	30.10	-136.00
PE33	Escuela El Papalón	28.7	5.29	221.0	110.00	2.69	29.60	-154.30
PE36	Escuela Los Encuentros	27.8	5.17	115.2	57.70	2.44	29.80	-161.80
PE37	Los Encuentros	29.3	5.18	196.7	98.20	3.40	41.00	-128.40

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la
cuenca El Sauce, León

Anexo X. Concentraciones de arsénico en aguas de la cuenca El Sauce

Anexo 10.1 Resultados de arsénico en agua superficial y subterránea

Código	Sitio de Muestreo	Coordenadas		Concentración de As (µg/l)		
		Este	Norte	may-06	oct-13	mar-14
AS1	Río El Portillo, Los Encuentros	537700	1433270	---	< ld	3.94
AS2	Río El Portillo, Hato Viejo	541079	1427618	---	< ld	3.94
AS3	Río San José, San José	553500	1419452	---	5.39	---
PP4	MABE Sabana Grande	555839	1417288	8.03	10.72	9.84
PP3	MABE San José - San Ramón	553839	1418672	---	---	3.39
PP11	La Suiza	549945	1422684	4.29	12.26	5.01
PE38	La Suiza	548852	1422709	---	---	< ld
PP31	Santa Sara	548620	1424050	---	---	< ld
PP13	San Nicolás	550158	1419534	---	2.8	3.23
PP12	Los Tololos	548760	1420395	---	---	4.4
PP17	Yugo Quebrado, ENACAL	546950	1423165	2.18	< ld	2.33
PP18	La Palomera, ENACAL	546356	1422845	< ld	---	< ld
PP20	Santa Bárbara	543978	1422638	5.05	12	12.82
PE39	El Cesteo	543617	1422633	---	---	4.66
PP22	MABE El Pílon	540974	1422364	---	---	3.32
PP24	Escuela El Chaparral	547471	1427805	---	13.67	17.41
PE40	Los Limones	546826	1427221	---	---	7.07
PP26	MABE Las Pilas	546047	1431906	< ld	< ld	< ld
PP28	MABE Las Lagunetas	542440	1428239	< ld	< ld	< ld
PE32	Limón Berbería	540898	1431127	---	< ld	---
PP30	Los Loros Centro	539738	1432391	---	---	2.29

AS: Agua Superficial (Río) PP: Pozo Perforado PE: Pozo Excavado

Fuente: Concentraciones may-06; INETER, 2008

Potencial hídrico y contaminación por arsénico con fines del manejo sostenible en la
cuenca El Sauce, León

Anexo 10.2 Parámetros físico químicos de campo en agua superficial y subterránea, octubre de 2013

Código	pH (Unid)	CE (us/cm)	SDT (ppm)	Oxig. D. (mg/L)	Sat. OD (%)	Temp. (°C)	Redox (mV)
AS1	5.45	169.3	85.5	9.39	55.7	28.6	-147.1
AS2	5.25	219	109	4.51	59.6	28.6	-195.6
AS3	6.77	155.3	77.7	4.5	55.1	27.6	-121.2
PP4	5.28	391	196	0.84	10.3	29.6	-184.7
PP11	5.12	325	163	1.1	14.7	27.9	-158.8
PP13	5.09	166.6	83.3	1.83	22.9	28.4	-126.6
PP17	5.42	205	103	4.08	55.4	30	-104.8
PP20	5.36	697	348	1.34	16	29.5	-192.4
PP24	5.16	235	117	0.95	12.3	30.3	-206.8
PP26	5.1	176.6	88.6	3.43	43.3	28.7	-135.5
PP28	5.18	269	134	3.61	49.7	29.9	-122.8
PE32	5.2	137	67.4	3.5	47	29.5	-169.3

AS: Agua Superficial (Río)

PP: Pozo Perforado

PE: Pozo Excavado