

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Caracterización de Acuíferos:
Caso de Estudio en Santa Elena, Ecuador**
Proyecto de Investigación

Nadya Lucía Capelo Portilla

Ingeniería Civil

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniera civil

Quito, 13 de mayo de 2019

Universidad San Francisco de Quito USFQ
Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Caracterización de Acuíferos:
Caso de Estudio en Santa Elena, Ecuador

Nadya Lucía Capelo

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Sixto Durán-Ballen, Ph.D.

Firma del profesor

Quito, 13 de mayo de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Nadya Lucía Capelo Portilla

Código: 00123485

Cédula de Identidad: 1720905403

Lugar y fecha: Quito, 13 de mayo de 201

Agradecimientos

A mis padres Vinicio y Alicia por su apoyo incondicional y constante, paciencia, amor y dedicación durante esta etapa.

A mi tutor de tesis Sixto Durán Ballén por su tiempo, dirección y consejo en el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, a Dios por permitirme alcanzar un nuevo logro.

Resumen

El agua potable es un recurso fundamental para el desarrollo socioeconómico de las comunidades. El cantón Santa Elena en Ecuador sufre un desabastecimiento de agua potable debido a la falta de fuentes hídricas superficiales. Por esta razón, en este proyecto de investigación se analiza la sostenibilidad de la explotación fuentes hídricas subterráneas, así como metodología para la protección del recurso hídrico.

Palabras Clave: Acuíferos, Recarga, Balance Hídrico, Contaminación, Hidrología, Infiltración Salina.

Abstract

Fresh water is an important resource for the socio-economic development of communities. The city of Santa Elena suffers from a lack of access to fresh water due to limited hydric resources on the surface. This project analyzes the sustainability of exploitation of underground hydric resources, as well as methods for protecting the resource.

Keywords: Aquifers, Recharge, Water Balance, Pollution, Hydrology, Saline Infiltration.

Contenido

Derechos de Autor	3
Índice de Figuras.....	10
Índice de Tablas	12
ANTECEDENTES	14
INTRODUCCIÓN.....	15
Objetivos.....	15
Justificación Del Proyecto	16
Marco Teórico.....	17
Recurso hídrico y su importancia.	17
Legislación vigente sobre el recurso hídrico en Ecuador	19
Recurso hídrico en Ecuador.....	21
Aguas subterráneas.	25
Contaminación en acuíferos.	31
Vulnerabilidad de los acuíferos en áreas costeras.	36
Comportamiento hidrológico de la intrusión salina.....	38
Pozos de agua	43
METODOLOGÍA.....	45
Ubicación	45
Análisis Poblacional	47
Análisis uso del recurso hídrico actual en Santa Elena	53

Demanda hídrica.....	53
Análisis Demanda Actual	55
Uso actual del agua subterránea en la zona	61
Análisis Hidrológico	63
Fuente Hídrica	63
Calidad del Agua	66
Características del Sector.....	68
Balance Hídrico de la Cuencas del Río Javita y del Río Zapotal	86
Recarga del Acuífero Atahualpa.....	90
Influencia de intercambio de aguas superficiales	97
Sostenibilidad de la Demanda	103
Manual de Procedimiento para la Autorización de Permisos para la Construcción de Pozos para el aprovechamiento de aguas subterráneas ..	105
Programa De Protección De Aguas Subterráneas Protocolo de prevención de la contaminación de aguas subterráneas	113
Protocolo para la Prevención De La Intrusión Salina.....	115
Protocolo para la Prevención de la Sobreexplotación del acuífero	117
Métodos para trabajar con autoridades y normativa vigente de protección de aguas subterráneas	118
Métodos para socializar a la población del cuidado del recurso	118
ANALISIS DE RESULTADOS.....	120
Conclusiones.....	120

Recomendaciones	123
Bibliografía.....	125

Índice de Figuras

FIGURA 1: DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN EL PLANETA	17
FIGURA 2: DISTRIBUCIÓN FUENTES DE AGUA DULCE EN EL GLOBO	18
FIGURA 3: CICLO HIDROLÓGICO DEL AGUA	18
FIGURA 4: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL RECURSO HÍDRICO EN ECUADOR.....	22
FIGURA 5: COBERTURA DE AGUA POR RED PÚBLICA POR PROVINCIA.....	23
FIGURA 6: COBERTURA DE AGUA POR RED PÚBLICA EN SANTA ELENA	24
FIGURA 7: ACUÍFERO LIBRE	25
FIGURA 8: ACUÍFERO CONFINADO.....	26
FIGURA 9: ACUÍFERO SEMI CONFINADO.....	27
FIGURA 10: CICLO DEL AGUA.....	29
FIGURA 11:RECARGA ARTIFICIAL DE UN ACUÍFERO.	29
FIGURA 12: ACUÍFERO COSTERO.....	34
FIGURA 13: CONDICIONES NORMALES ACUÍFERO COSTERO.....	35
FIGURA 14: INTRUSIÓN SALINA.....	35
FIGURA 15: ACUÍFERO COSTERO.....	36
FIGURA 16: TABLA MÉTODO SEA- GINDEX	37
FIGURA 17: EQUILIBRIO NIVELES FREÁTICOS EN ACUÍFERO COSTERO	38
FIGURA 18: TOMOGRAFÍA DE UN ACUÍFERO	40
FIGURA 19: UBICACIÓN ZONA DE ESTUDIO	45
FIGURA 20: MAPA POLÍTICO DE SANTA ELENA.....	47
FIGURA 21: PIRÁMIDE POBLACIONAL PROVINCIA DE SANTA ELENA	48
FIGURA 22:CRECIMIENTO POBLACIONAL CANTÓN SANTA ELENA.....	52
FIGURA 23: DOTACIÓN DE AGUA PARA CONSUMO DOMÉSTICO	54
FIGURA 24: DISTRIBUCIÓN ZONA DE CULTIVOS DH GUAYAS.....	58
FIGURA 25: PROYECCIÓN CRECIMIENTO DE CULTIVOS SEGÚN MAGAP.....	60
FIGURA 26: DEMARCACIÓN HÍDRICA GUAYAS	63
FIGURA 27: SISTEMAS DE ACUÍFEROS EN LA PROVINCIA DE SANTA ELENA	65
FIGURA 28:ÁREA DE INTERÉS PARA ESTUDIO ACUÍFERO ATAHUALPA	68
FIGURA 29: UBICACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	69

FIGURA 30: PARTE ESTE DE LA PROVINCIA DE SANTA ELENA	70
FIGURA 31: PERFIL GEOLÓGICO LÍNEA AB.....	71
FIGURA 32: CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	72
FIGURA 33: MAPA DE ISOYETAS REPÚBLICA DEL ECUADOR.....	73
FIGURA 34: DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN EN SANTA ELENA.....	74
FIGURA 35: UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO HIDROLÓGICO EN ECUADOR	75
FIGURA 36: VARIACIÓN MENSUAL EN ESCORRENTÍA	76
FIGURA 37: COEFICIENTES MÉTODO DE NADAL	77
FIGURA 38: MAPA EVOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL EN ECUADOR	78
FIGURA 39: DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA EVOTRANSPIRACIÓN.....	79
FIGURA 40: CURVA DE VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN.....	81
FIGURA 41: BALANCE HÍDRICO DE UNA CUENCA	87
FIGURA 42: BALANCE HÍDRICO CUENCA RÍO JAVITA	88
FIGURA 43: BALANCE HÍDRICO CUENCA DEL RÍO ZAPOTAL	89
FIGURA 44: VALORES TÍPICOS DE HUMEDAD POR TIPO DE SUELO.....	91
FIGURA 45: MAPA ESTRUCTURAL DE LA CUENCA DEL RÍO JAVITA	102
FIGURA 46: SISTEMA DE PERFORACIÓN TIPO TORRE.....	110
FIGURA 47: PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DEL POZO.....	115
FIGURA 48: SISTEMA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE ECUADOR.....	116

Índice de Tablas

TABLA 1: DATOS INICIALES POBLACIÓN RURAL SANTA ELENA.....	49
TABLA 2: DIFERENCIA DE POBLACIÓN ENTRE CENSOS	49
TABLA 3: PORCENTAJES DE CRECIMIENTO POBLACIÓN	49
TABLA 4: TASAS DE AUMENTO ANUAL DE LA POBLACIÓN CANTÓN SANTA ELENA.....	50
TABLA 5: DATOS INICIALES DE POBLACIÓN CANTÓN SANTA ELENA	50
TABLA 6: ESTIMACIÓN DE LA POBLACIÓN EN SANTA ELENA	51
TABLA 7: PROYECCIONES DE CONSUMO GRUPO HÍDRICO JAVITA.....	55
TABLA 8: PROYECCIONES CONSUMO L/ (HAB/DÍA) GRUPO HÍDRICO JAVITA	56
TABLA 9: PORCENTAJE DE CONSUMO ANUAL GRUPO HÍDRICO JAVITA.....	56
TABLA 10: PROYECCIÓN DEMANDA PROMEDIO DE AGUA EN EL ÁREA RURAL DEL CANTÓN SANTA ELENA	57
TABLA 11: PROYECCIÓN DEMANDA AGUA DE RIEGO	60
TABLA 12: DISTRIBUCIÓN MENSUAL LLUVIAS EN EL SECTOR CUENCA DEL RÍO JAVITA ..	74
TABLA 13: DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LLUVIAS EN LA CUENCA DEL RÍO ZAPOTAL	74
TABLA 14: DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE ESCORRENTÍA PERÍODO 1971-2010	76
TABLA 15: FACTORES MÉTODO DE NADAL	78
TABLA 16: COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA	78
TABLA 17: EVOTRANSPIRACIÓN REAL MENSUAL PARA LA CUENCA DEL RÍO JAVITA.....	79
TABLA 18: EVOTRANSPIRACIÓN REAL PARA LA CUENCA DEL RÍO ZAPOTAL	79
TABLA 19: COEFICIENTE POR TEXTURA DEL TERRENO CUENCA DEL RÍO JAVITA.....	83
TABLA 20: COEFICIENTE POR TEXTURA DEL TERRENO CUENCA DEL RÍO ZAPOTAL	84
TABLA 21: COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN CUENCA DEL RÍO JAVITA	84
TABLA 22: COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN CUENCA DEL RÍO ZAPOTAL.....	84
TABLA 23: INFILTRACIÓN PLUVIAL MENSUAL CUENCA DEL RÍO JAVITA.....	85

TABLA 24: INFILTRACIÓN PLUVIAL MENSUAL CUENCA DEL RÍO ZAPOTAL.....	85
TABLA 25: BALANCE HÍDRICO RÍO JAVITA	88
TABLA 26: BALANCE HÍDRICO CUENCA DEL RÍO ZAPOTAL	89
TABLA 27: CAPACIDAD DE CAMPO Y PUNTO DE MARCHITEZ DE UN SUELO	92
TABLA 28: DATOS INICIALES PARA CÁLCULO DE COEFICIENTE HUMEDAD FINAL CUENCA DEL RÍO JAVITA	92
TABLA 29: DATOS INICIALES PARA CÁLCULO DE COEFICIENTE HUMEDAD FINAL CUENCA DEL RÍO ZAPOTAL	93
TABLA 30: DATOS INICIALES EN MM PARA CUENCA DEL RÍO JAVITA.....	93
TABLA 31: DATOS INICIALES EN MM PARA CUENCA RÍO ZAPOTAL.....	93
TABLA 32: COEFICIENTE HUMEDAD FINAL PARA CUENCA DEL RÍO JAVITA	93
TABLA 33: COEFICIENTE HUMEDAD FINAL CUENCA DEL RÍO ZAPOTAL	93
TABLA 34: RECARGA MENSUAL DEL ACUÍFERO CUENCA DEL RÍO JAVITA	94
TABLA 35: RECARGA DEL ACUÍFERO CUENCA DEL RÍO ZAPOTAL.....	94
TABLA 36: RECURSO HÍDRICO DISPONIBLE.....	96
TABLA 37: VOLUMEN DE AGUA FILTRADO POR RÍO.....	101
TABLA 38: VOLUMEN FILTRADO NETO DEBIDO A AGUAS SUPERFICIALES	101
TABLA 39: DEMANDA HÍDRICA PARA USO DE CULTIVOS.....	103
TABLA 40: DEMANDA HÍDRICA PARA USO DOMÉSTICO	103
TABLA 41: DEMANDA HÍDRICA TOTAL	104

ANTECEDENTES

La precipitación en la Provincia de Santa Elena es escasa y provoca un déficit hídrico crucial para el abastecimiento de agua potable en el sector. En la provincia la mayor cantidad de agua potable se obtiene de fuentes superficiales cercanas como lo es el Río Daule. Sin embargo, para otra área de la provincia, principalmente rural, la fuente hídrica más cercana y disponible resulta ser el recurso hídrico subterráneo. Debido a esto, se necesita un análisis de la demanda hídrica y del uso del agua en el sector, así como de una evaluación de las aguas subterráneas y del nivel de recarga de la fuente del recurso el acuífero “Atahualpa” para evaluar si efectivamente esta fuente de agua puede proveer a estas poblaciones del recurso hídrico sin recurrir a una sobre explotación.

Además, se propone el desarrollar programas y normativas que sean de ayuda para que se cumpla el objetivo de tener una explotación de este acuífero que sea sostenible y que además haga que se cumplan con los derechos constitucionales de los habitantes de estas poblaciones a tener acceso al agua potable con calidad y eficiencia.

INTRODUCCIÓN

Objetivos

- Determinar los diversos usos del agua y las demandas actuales y futuras en la Provincia de Santa Elena.
- Proponer un proceso de autorización de permisos para la construcción de pozos para el aprovechamiento de aguas subterráneas. (Proceso de permisos y captura de información).
- Desarrollar un programa para la protección del cabezal del pozo y radio de influencia del pozo.
- Determinación del mecanismo y tasas de recarga de aguas subterráneas en la región.
- Realizar un estudio hidrológico con el fin de evaluar el balance hídrico de aguas subterráneas y su intercambio de aguas superficiales en la región.
- Proponer directrices y lineamientos para una buena planificación y prácticas de manejo integrado de aguas subterráneas.

Justificación Del Proyecto

El recurso hídrico es muy importante en el desarrollo económico y social de una población. Por esto, es importante cuantificar los recursos hídricos disponibles para la planificación y desarrollo de la comunidad. Ecuador posee abundancia de recursos hídricos. Sin embargo, estos están distribuidos de manera irregular lo cual puede representar un problema para el abastecimiento de agua potable en ciertas poblaciones.

Las aguas subterráneas en la provincia de Santa Elena son la principal fuente de agua en las comunidades rurales. Por esta razón, es conveniente analizar las necesidades de consumo de agua potable en la provincia con el fin de determinar si las aguas subterráneas del sector pueden abastecer la demanda actual y futura de la población sin poner en riesgo la calidad del agua y la existencia del acuífero que se explota.

Además, se debe analizar los tipos de pozos utilizados para la explotación del recurso hídrico, si su operación o construcción son fuente de contaminación y finalmente se deberá analizar la normativa con el fin de determinar si es eficiente en la protección del recurso hídrico, así como en la protección del derecho a acceso al agua potable de las poblaciones de esta región.

Marco Teórico

Recurso hídrico y su importancia.

El agua es un recurso de vital importancia para la humanidad. Este recurso ha estado ligado al desarrollo de las naciones desde las primeras civilizaciones, que se asentaron a orillas de los ríos. Asimismo, en nuestros días la importancia de este recurso para el desarrollo de los países es fundamental ya que la falta de este recurso puede provocar una crisis energética, de falta de alimentos e inestabilidad en los mercados económicos (UNESCO, 2009)

Así, la importancia de este recurso no se debe entender solamente desde un punto de demanda y oferta de este, sino más bien desde una multitud de variables sociológicas, económicas, demográficas e inclusive químicas y biológicas (UNESCO, 2009).

El agua dulce es un recurso escaso. Esto debido a que aproximadamente la mayoría del agua en el planeta se encuentra en los océanos y no es apta para el consumo humano. Así, el agua dulce del planeta representa apenas el 3% del agua disponible, además el agua dulce no siempre es disponible para el consumo ya que la mayoría se encuentra en glaciares (UNESCO, 2009)

Figura 1: Distribución de agua en el planeta

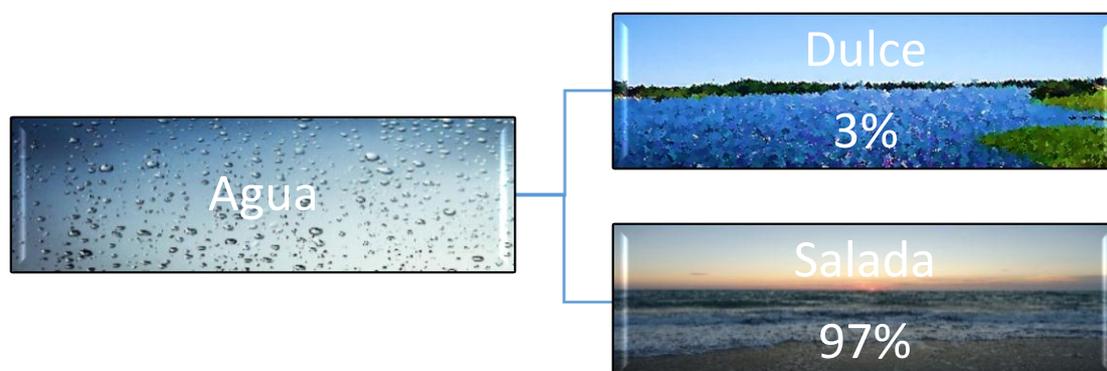


Figura 2: Distribución fuentes de agua dulce en el globo



El agua siempre está en movimiento. Así el recurso hídrico depende siempre del ciclo hidrológico del agua. El ciclo hidrológico del agua es un modelo que describe los cambios de estado del agua y también los cambios en la posición de esta entre la atmósfera, litósfera, e hidrósfera. El agua se mueve entre estas a través de procesos como: evaporación, condensación, precipitación, sublimación, transpiración e infiltración (Ordoñez, 2011).

Figura 3: Ciclo hidrológico del agua



Fuente: (Ordoñez, 2011)

El agua en el planeta no se distribuye de manera uniforme. Debido a esto existen zonas donde el agua dulce es más escasa y consecuentemente el acceso al agua potable para las comunidades que residen en este medio requiere mayor infraestructura.

Legislación vigente sobre el recurso hídrico en Ecuador

El acceso al agua es un derecho constitucional en el estado ecuatoriano como se estipula en la Constitución de la República del Ecuador en los artículos 71-74. Por esta razón, existen en el país entes rectores que garantizan el acceso al agua como son el Ministerio del Ambiente, Agencia de Control y Regulación del Agua, la Secretaria del Agua, y los Gobiernos Autónomos Descentralizados.

Además, el manejo de recursos hídricos en el país está normado mediante la Ley Orgánica Recursos Hídricos (2014). Esta estipula lo siguiente sobre en su artículo 13:

“El Estado, los sistemas comunitarios, juntas de agua potable y juntas de riego, los consumidores y usuarios, son corresponsables en la protección, recuperación y conservación de las fuentes de agua y del manejo de páramos, así como la participación en el uso y administración de las fuentes de aguas que se hallen en sus tierras, sin perjuicio de las competencias generales de la Autoridad Única del Agua de acuerdo con lo previsto en la Constitución y en esta Ley”

De acuerdo con esto, tanto la comunidad como el estado son responsables por mantener las fuentes de agua y la sustentabilidad de estas. Esto también aplica en el caso de aguas subterráneas.

Para el aprovechamiento de aguas subterráneas la misma ley estipula en su artículo 119 que para la explotación de esta forma de recurso hídrico se debe aprobar una licencia, y que esta explotación debe ser coherente con la velocidad de reposición del acuífero, la

calidad de agua de este y los reglamentos vigentes. Esto para conservar las fuentes hídricas como se estipulo en el artículo 13 de la misma ley.

Recurso hídrico en Ecuador.

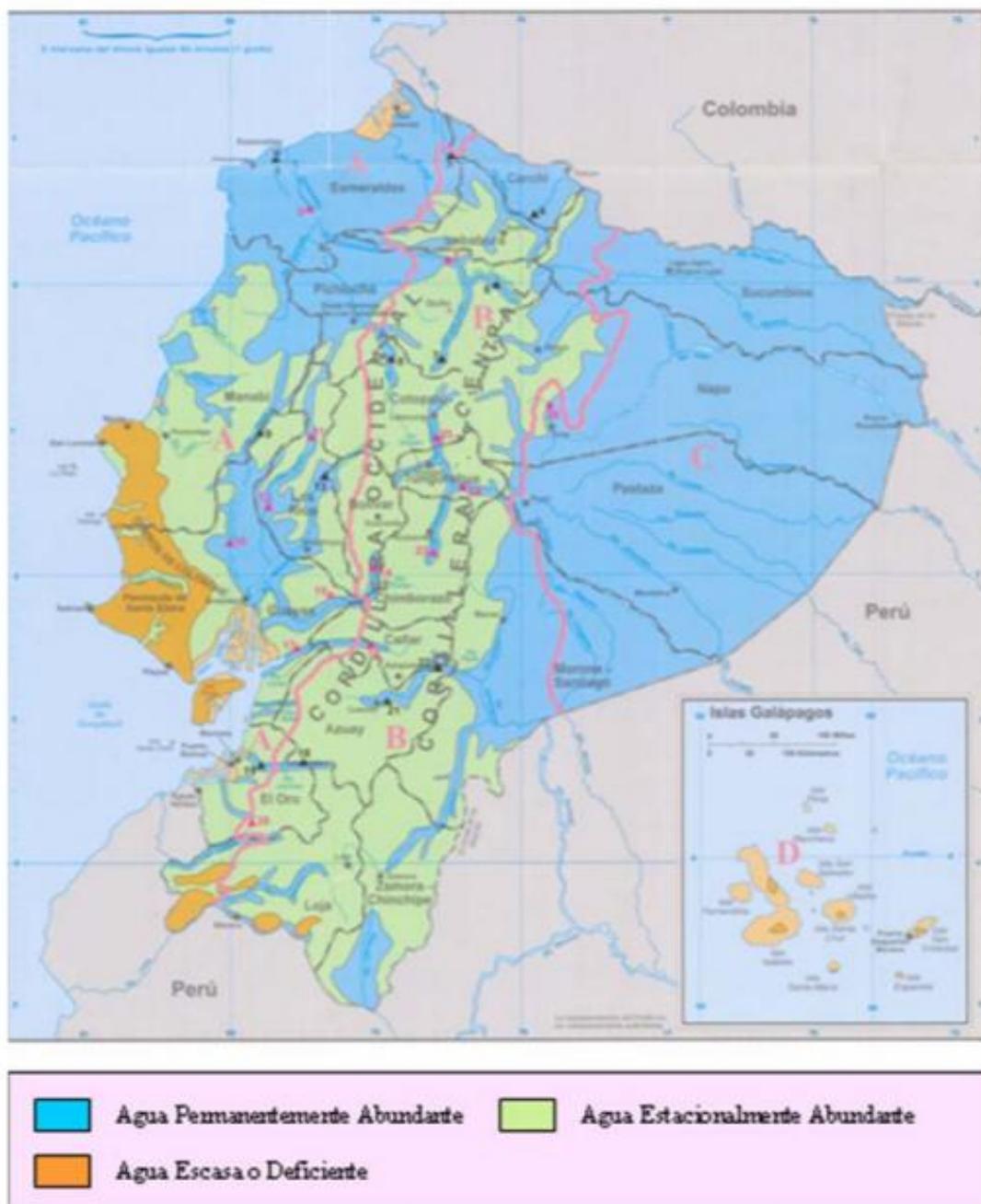
En Ecuador el recurso hídrico es relativamente abundante. Su precipitación media anual según el Plan Nacional del Agua elaborado por la CISPDR es de 2249 mm. Sin embargo, debido a la geología y la geografía del país esta precipitación se ve distribuida de manera heterogénea. Así, la zona oriental y los flancos andinos experimentan grandes precipitaciones, mientras que en las zonas costeras y de valles interandinos las precipitaciones son escasas (Changjiang Institute of Survey, Planning , Design or Research, 2016).

Así mismo, la distribución de las precipitaciones en función del tiempo también varía. De esta manera en la costa los meses húmedos son entre diciembre y mayo con un 70-95% de precipitaciones entre estos meses. Por otro lado, en la Sierra los meses húmedos son de octubre a diciembre y de febrero a mayo. En el Oriente, las precipitaciones se distribuyen de manera uniforme durante todo el año (CISPDR, 2016).

El Ecuador posee aproximadamente 376 kilómetros cúbicos de agua dulce en sus reservas. El recurso se encuentra distribuido heterogéneamente. Así, el 65% de los recursos hídricos del país se encuentran en la Amazonía, mientras que en la Sierra y la costa se encuentran el 16% y el 19% de los recursos hídricos respectivamente (Changjiang Institute of Survey, Planning , Design or Research, 2016).

Esto plantea un problema debido a que la mayoría de la población se encuentra en las áreas costeras y en el valle interandino, mientras que la mayoría de los recursos hídricos se encuentran en la Amazonía. Además, el desarrollo tanto económico como industrial se da en grandes ciudades lo cual hace que aumente también la demanda de agua en el país. Se estima que aproximadamente la demanda de agua aumentará en un 25% de 2010 a 2025 (Changjiang Institute of Survey, Planning , Design or Research, 2016).

Figura 4: Distribución espacial recurso hídrico en Ecuador



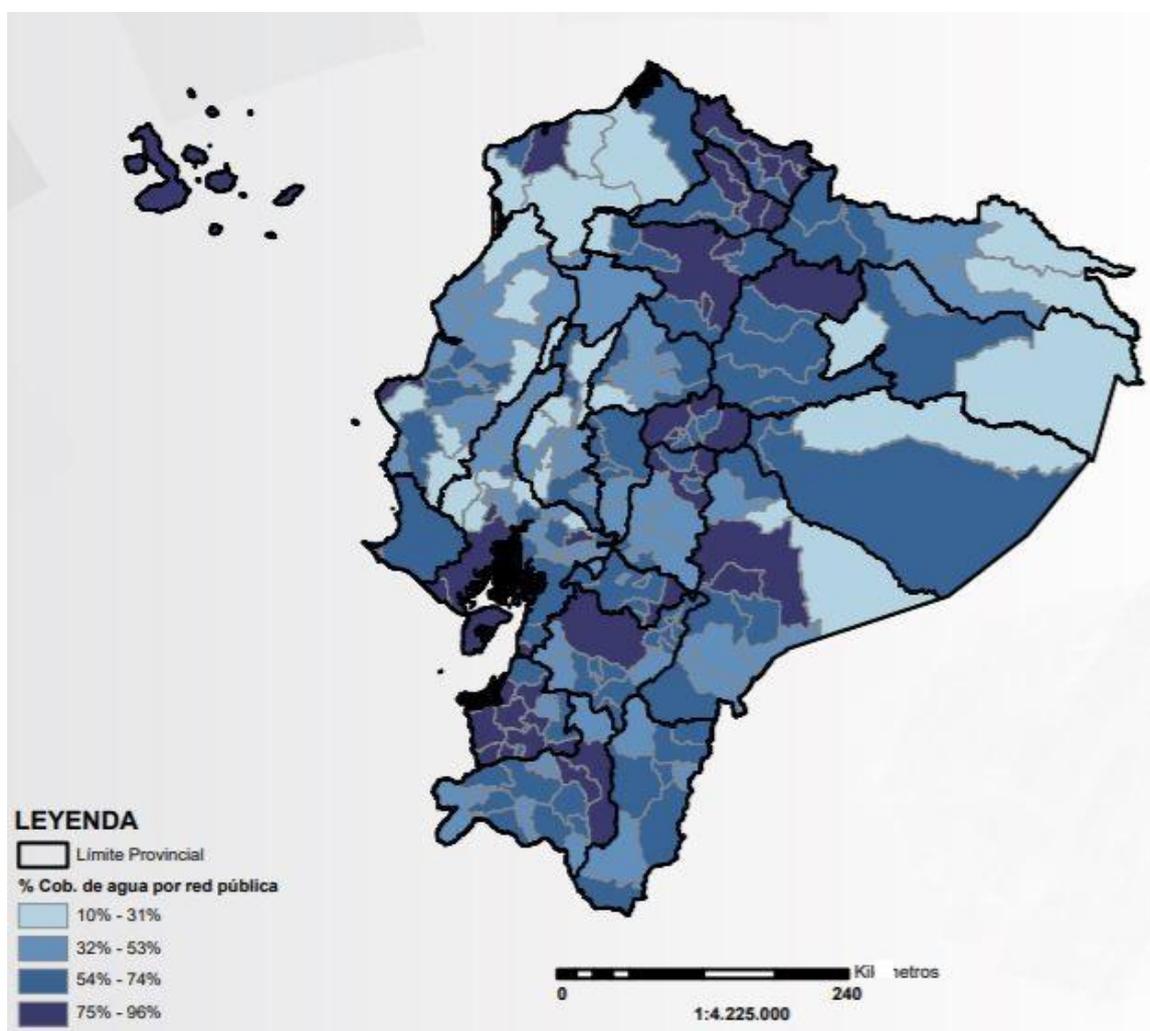
Fuente: (SENAGUA,2010)

Existen en el país dos categorías con respecto al acceso al agua potable. La primera es mediante la red pública de agua, esta categoría involucra la existencia de una infraestructura adecuada y comprende del 78.02% según el INEC de todas las viviendas

según datos de 2014. La segunda categoría es una miscelánea de fuentes de acceso al agua potable entre ellas: pozos, tanqueros, agua de acequias, etc.

Esta categoría generalmente no requiere de la presencia de grandes obras de infraestructura y abarca el resto de las viviendas en el país. También cabe recalcar que según datos del INEC tan sólo el 70.1% de ecuatorianos cuenta con agua potable adecuada tanto en cantidad como calidad en su vivienda o de una fuente cercana a esta.

Figura 5: Cobertura de agua por red pública por provincia.



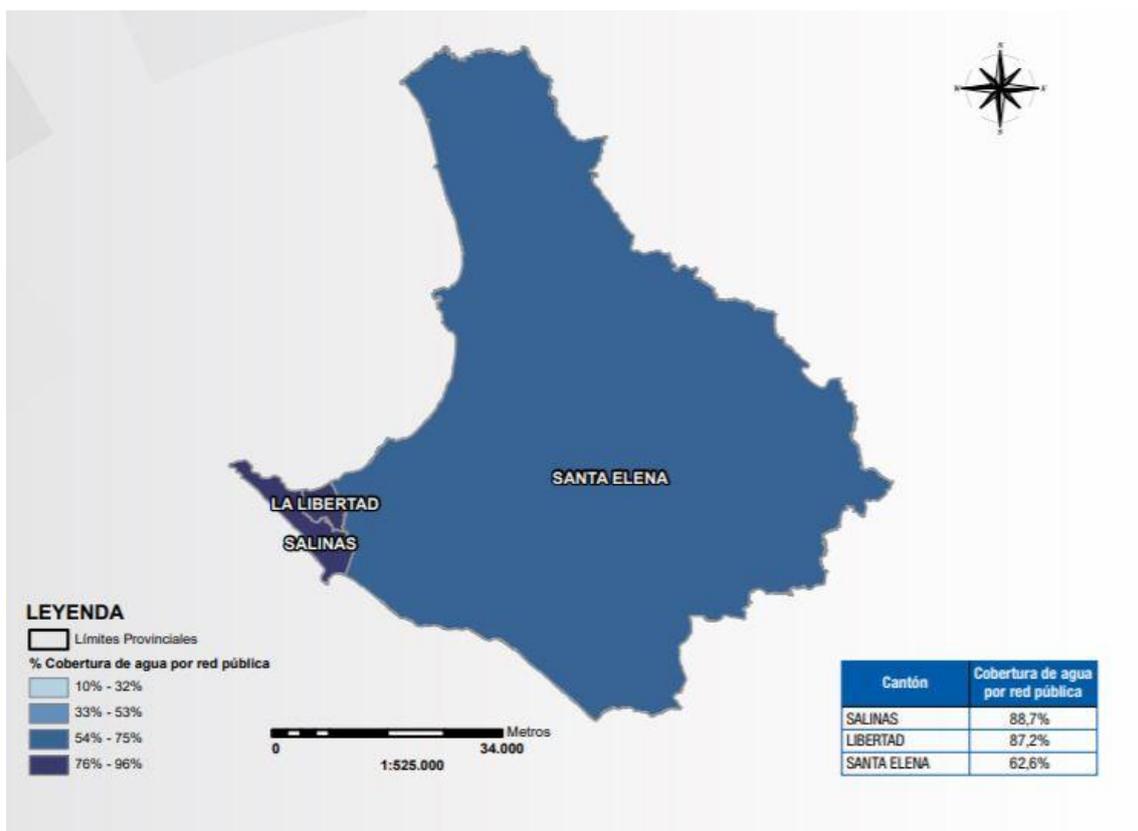
Fuente: (INEC, 2010)

En este caso de estudio particular es la provincia de Santa Elena. Para la misma, las estadísticas de acceso a agua potable se encuentran en una relación similar a otras

provincias del país. Sin embargo, en esta provincia la particularidad es que existe un porcentaje significativo de agua potable recuperada de pozos. Los datos del INEC indican que en esta provincia el 90.3% de sus habitantes tiene acceso a agua potable.

A pesar de esto, este acceso al agua potable es muy reciente y la provincia sigue teniendo problemas en cuanto al acceso a este servicio. El sistema de agua potable inició su operación en el año 2000 administrado por AGUAPEN. Este sistema de agua por fuentes superficiales es insuficiente y no abastece a áreas rurales que todavía obtienen agua de fuentes como tanqueros y pozos de aprovechamiento de aguas subterráneas. Esto muchas veces no garantiza la calidad del agua para estas poblaciones.

Figura 6: Cobertura de agua por red pública en Santa Elena



Fuente: (INEC, 2010)

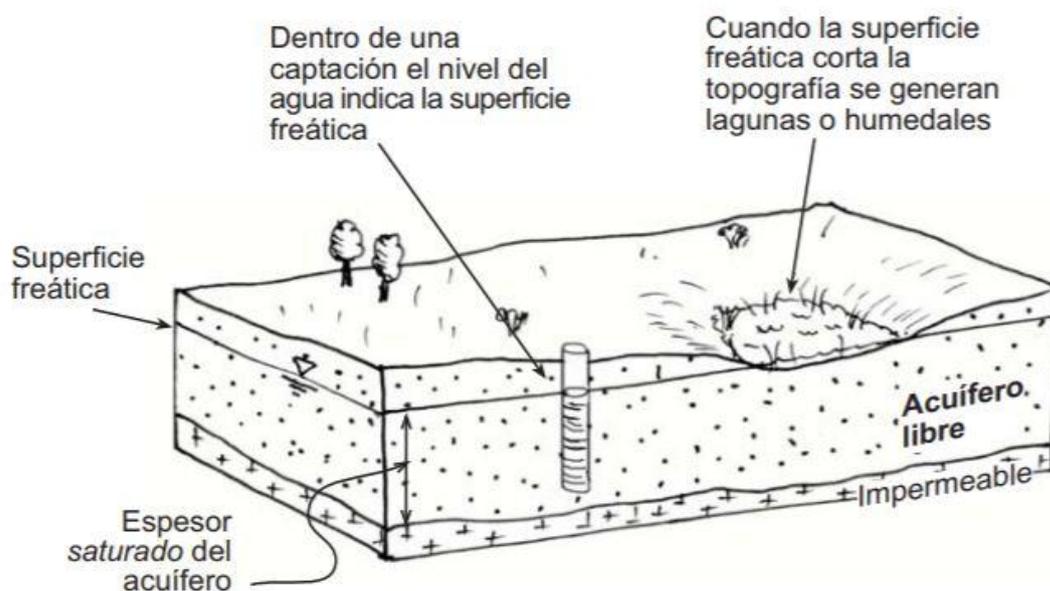
Aguas subterráneas.

Aguas subterráneas son aquellas existentes entre los intersticios de un terreno. Los cuerpos de aguas subterráneas se pueden originar debido a diferentes fuentes de agua como son: lluvias, ríos, quebradas superficiales o subterráneas. Sin embargo, no todos los cuerpos de aguas subterráneas son aptos para extracción del recurso hídrico. El cuerpo de agua apto para la explotación del recurso hídrico se denomina acuífero.

El acuífero es una formación geológica de gradiente hidráulico ordinario que puede almacenar y transmitir el recurso hídrico fácilmente. Existen diferentes tipos de acuíferos debido a la presión hidrostática que mantienen estos son:

- **Acuífero libre:** Son aquellos cuya superficie freática tiene una presión igual a la de la atmósfera, es decir, se encuentra a nivel superficial. Al extraerse agua de este tipo de acuíferos el nivel de superficie freática desciende. Se recargan solamente desde la superficie (Ordoñez, 2011).

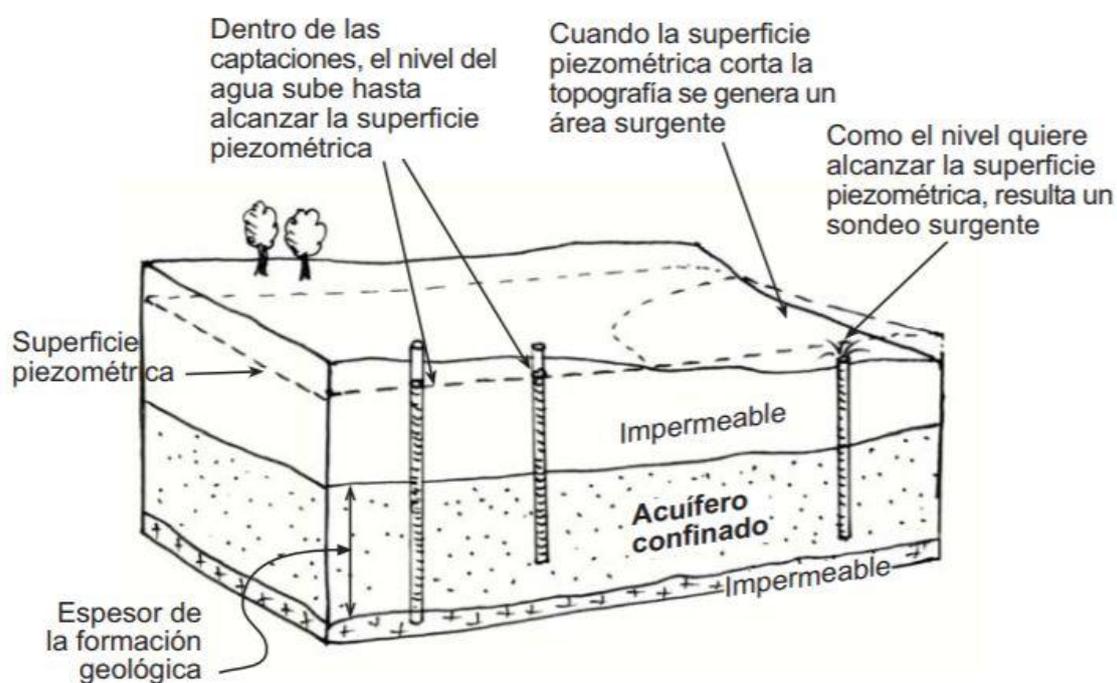
Figura 7: Acuífero libre



Fuente: (Sanchez, 2007)

- **Acuífero confinado:** Son aquellos cuya superficie freática tiene un nivel de presión mayor al de la atmósfera formándose una capa impermeable. Así la extracción de recurso hídrico de los mismos ocasiona una descompresión del agua. En casos extremos y debido a una sobre explotación del recurso de podría ocasionar una falla en el suelo sobre el mismo (Ordoñez, 2011).

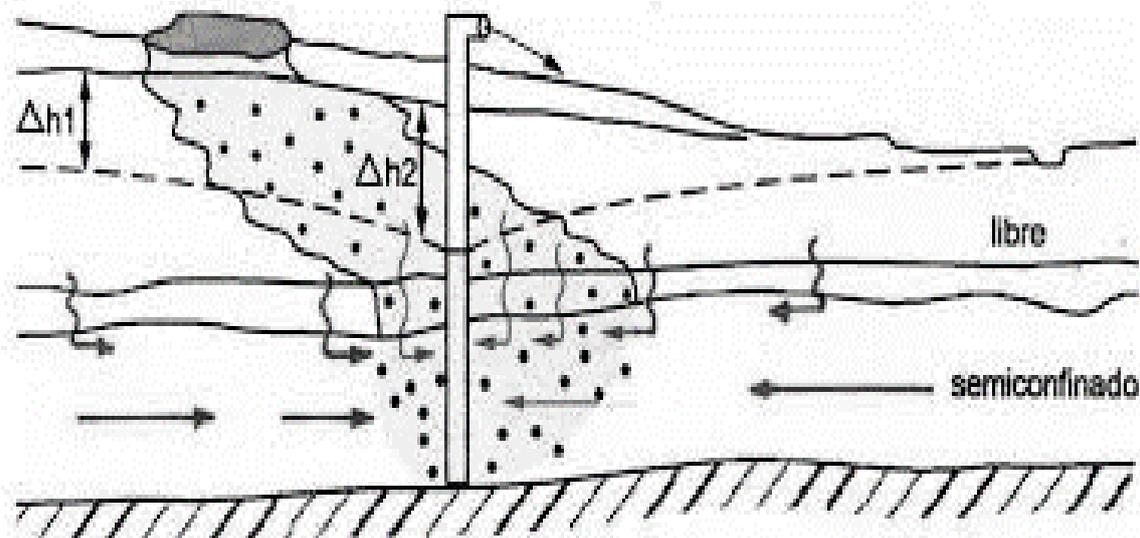
Figura 8: Acuífero confinado



Fuente: (Sanchez, 2007)

- **Acuífero semiconfinado:** Son aquellos en los cuales la capa permeable que los rodea se encuentra solamente en el límite inferior del mismo, con llevando a que el límite superior sea poco permeable. Este tipo de acuíferos se recargan con más dificultad que los confinados (Ordoñez, 2011).

Figura 9: Acuífero semi confinado



Fuente: (Sanchez, 2007)

Así, existen diversos factores que pueden incidir en la capacidad para almacenar el agua en un acuífero además de si este es confinado o no. Factores importantes son:

- **Porosidad:** Son las pequeñas aberturas o intersticios en las rocas. De la estructura o de la interconexión de los poros depende el almacenamiento de agua en el acuífero (Arocha, 1980).
- **Permeabilidad:** Es la propiedad de una roca de permitir o no el paso de agua. Depende de la interconexión de sus poros debido a que si los espacios no están conectados entre sí el flujo de agua sería inexistente. Este flujo depende del tamaño y forma de las partículas y de la viscosidad del agua (Arocha, 1980).
- **Transmisibilidad:** Es la medida de la capacidad de un acuífero para transmitir agua. Es el producto entre la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero. Esta propiedad asume que el flujo a través de un acuífero es horizontal

lo cual no siempre es cierto. Por esta razón este parámetro puede ser inexacto (Arocha, 1980).

- **Coefficiente de Almacenamiento:** Es la medida de volumen que es capaz de liberar un acuífero al descender una unidad de nivel piezométrico (Arocha, 1980).

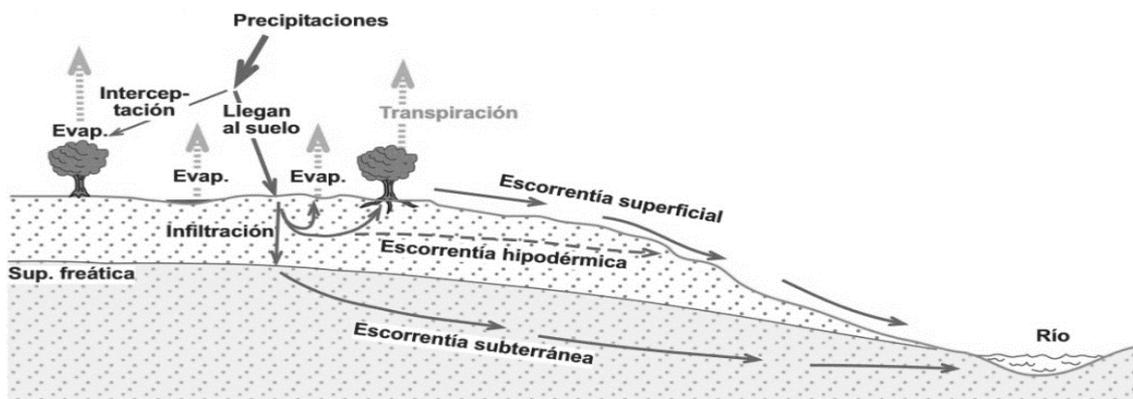
Una de las amenazas al recurso hídrico es la sobre explotación. Esta se da cuando se obtiene el recurso hídrico a una tasa mayor que la tasa de recarga. Esto puede conllevar el agotamiento del recurso. Es también importante resaltar que la forma de recarga de un acuífero es una variable por tomar en cuenta al explotar el recurso hídrico. Existen varias formas de recarga para un acuífero.

Estas son:

- **Infiltración natural:** Es la infiltración que ocurre en un terreno debido a la gravedad y las fuerzas de atracción molecular. La magnitud de la infiltración o de recarga natural en un acuífero depende de las precipitaciones y de las condiciones del terreno (Ordoñez, 2011).
- **Infiltración por corrientes superficiales:** Existen dos tipos de corrientes superficiales: las influyentes y las efluentes. En las corrientes influyentes el nivel de las aguas superficiales se encuentra por sobre la superficie freática y el agua pasa desde la corriente superficial a la zona de saturación.

En las corrientes efluentes el nivel de las aguas se encuentra por debajo de la superficie freática y esto conlleva a que pueda recibir aportaciones de agua de los mantos de las laderas (Ordoñez, 2011).

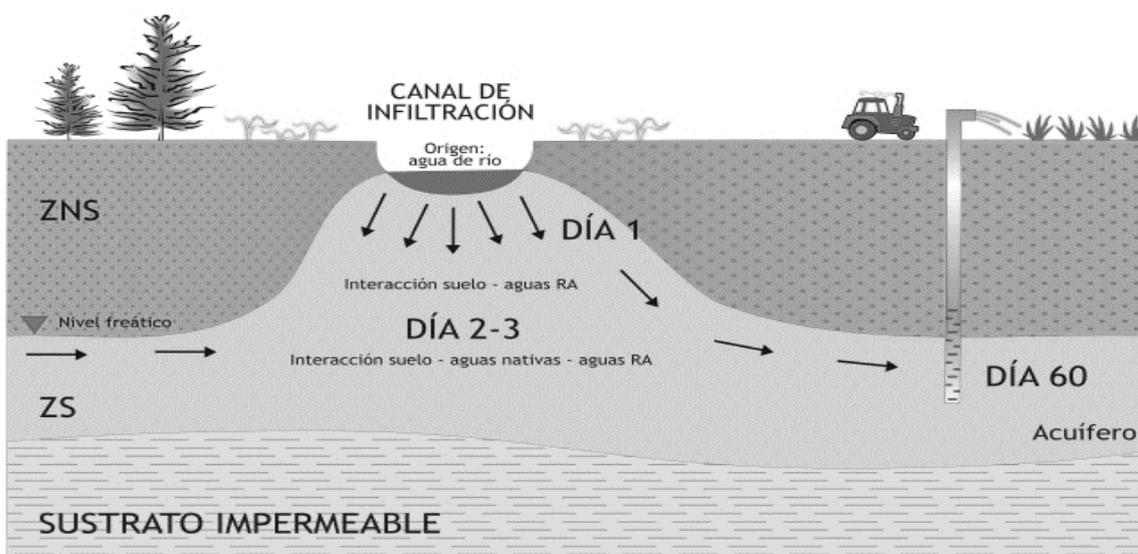
Figura 10: Ciclo del agua



Fuente: (Sanchez, 2007)

- **Recarga por medio de regadíos:** Es el efecto que se produce debido al agua de riego en zonas de cultivo. Un pequeño porcentaje del agua usada con fines de cultivo puede infiltrarse y recargar un acuífero (Ordoñez, 2011).
- **Recarga artificial:** Es el facilitar el paso de una fuente de agua superficial hacia un acuífero por medio de la infiltración en lugares clave (Ordoñez, 2011).

Figura 11: Recarga artificial de un acuífero.



Fuente: (Ordoñez, 2011)

La importancia de los acuíferos radica en que estos pueden ser de utilidad para comunidades humanas. Por esta razón es importante prevenir que estos se vean afectados por la contaminación. Ya que esta tiene consecuencias en la calidad de vida de los habitantes de la población que utiliza este recurso.

Contaminación en acuíferos.

La contaminación en los acuíferos se puede definir como toda alteración o cambio del estado natural de las aguas subterráneas debido a la acción o actividad humana. Así, para verificar el estado de las aguas subterráneas se deben realizar estudios fisicoquímicos de muestras de agua y compararlos con valores estándar (Sauquillo A. , 1994).

La contaminación en el agua puede tener varias causas entre las cuales se encuentran las siguientes:

- Uso de pesticidas o fertilizantes para actividades agrícolas
- Actividad ganadera y residuos de esta
- Vertederos de residuos sólidos urbanos o industriales
- Lixiviados
- Presencia de contaminación previa en ríos aledaños
- Humos y polvos contaminantes presentes en las precipitaciones del sector
- Actividades de extracción de minerales
- Derrames de líquidos contaminantes en el subsuelo
- Intrusión salina

Los acuíferos son muy vulnerables frente a la contaminación. Adicionalmente, este proceso de contaminación a pesar de ser lento es muy difícil de ser detectado. Esta contaminación puede darse de las siguientes maneras:

- **Contaminación química**

Es la contaminación caracterizada por la aparición de componentes tóxicos en cantidades mayores a las permitidas en el agua. Este tipo de contaminación altera

la química del agua y es nociva para la salud de las personas. Esta se debe a la acción humana en la mayoría de los casos.

Algunos de los contaminantes a revisar son: residuos biológicos, químicos presentes en medicamentos, bromatos, hidrocarburos, fenoles, fenilos, nitratos y nitritos (Sauquillo A. , 1994).

Algunas de las consecuencias de los contaminantes químicos en el agua son:

- Son nocivos para la salud ya que resultan en composiciones carcinogénicas
 - Las acciones tóxicas de los contaminantes pueden pasar a los alimentos
 - Limitaciones en el uso del agua para fines agropecuarios
- **Contaminación física:**
 - Color: Indica la presencia de ciertos componentes en el agua no disueltos. Como minerales. Esto incide en el color del agua que puede tornarse rojiza ante la presencia de compuestos ferrosos, negra ante la presencia de componentes de manganeso.

Este cambio de color no representa un riesgo para la salud (Sauquillo A. , 1994) .
 - Turbidez: Esta se ocasiona debido a la presencia de sustancias insolubles en suspensión. Estas sustancias pueden ser coloides o microorganismos. Este tipo de contaminación afecta la transparencia del agua (Sauquillo A. , 1994).
 - Temperatura: La temperatura del agua tiene incidencia en las propiedades físicas y biológicas de la misma. Además, la temperatura influye en el nivel de solubilidad de gases, sales, etc.

La temperatura térmica se puede detectar cuando la temperatura es mayor en 3°C a la temperatura de cuerpos de agua cercanos (Sauquillo A. , 1994).

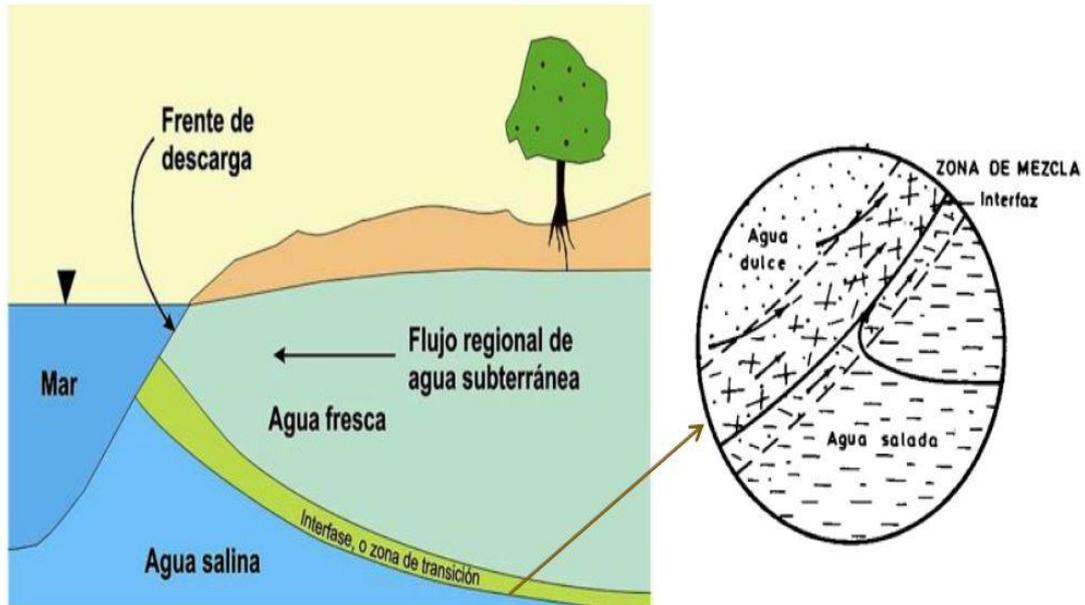
- Conductividad: Este parámetro se refiere a la conductividad eléctrica. Esto quiere decir la capacidad del agua de conducir electricidad. Este parámetro depende de la temperatura del agua. Este parámetro influye en la dureza del agua ya que, a mayor conductividad, mayor solubilidad de carbonatos y sales de magnesio.

Una contaminación por conductividad significaría la excesiva presencia de minerales en el agua (Sauquillo A. , 1994).

- Sólidos: La presencia de sólidos advierte que existen materiales insolubles presentes en el agua. Estas partículas pueden ser orgánicas e inorgánicas. Los sólidos suspendidos son la mayor fuente de contaminación en el agua. (Sauquillo A. , 1994)
- pH: Es la medida de iones hidrógeno presentes en el agua. A mayor presencia de iones hidrógeno mayor es la acidez del medio. Así en el agua el pH debe estar entre 6 y 7 es decir debe ser neutro (Sauquillo A. , 1994)
- Intrusión Salina: En los acuíferos que se encuentran cerca del área costera uno de los problemas más importantes para la conservación de los acuíferos es a infiltración del agua marina, que tiene presencia de sales, en el cuerpo de agua dulce.

Este proceso se da debido a que los acuíferos están conectados con el mar mediante una cuña de separación llamada cuña salina (Terán, 2018).

Figura 12: Acuífero Costero



Fuente: (Terán, 2018)

El proceso de intrusión salina ocurre cuando el agua marina se infiltra en un acuífero gracias a que esta tiene mayor densidad que el agua dulce. Debido a que el agua salada tiene mayor densidad, en el fondo se forma una columna de agua salada mayor que la columna de agua dulce lo que permitiría la infiltración.

Bajo condiciones normales esto no se daría ya que la columna de agua dulce sería mayor lo cual impediría el paso del agua salada (Terán,2018).

Figura 13: Condiciones normales acuífero costero.

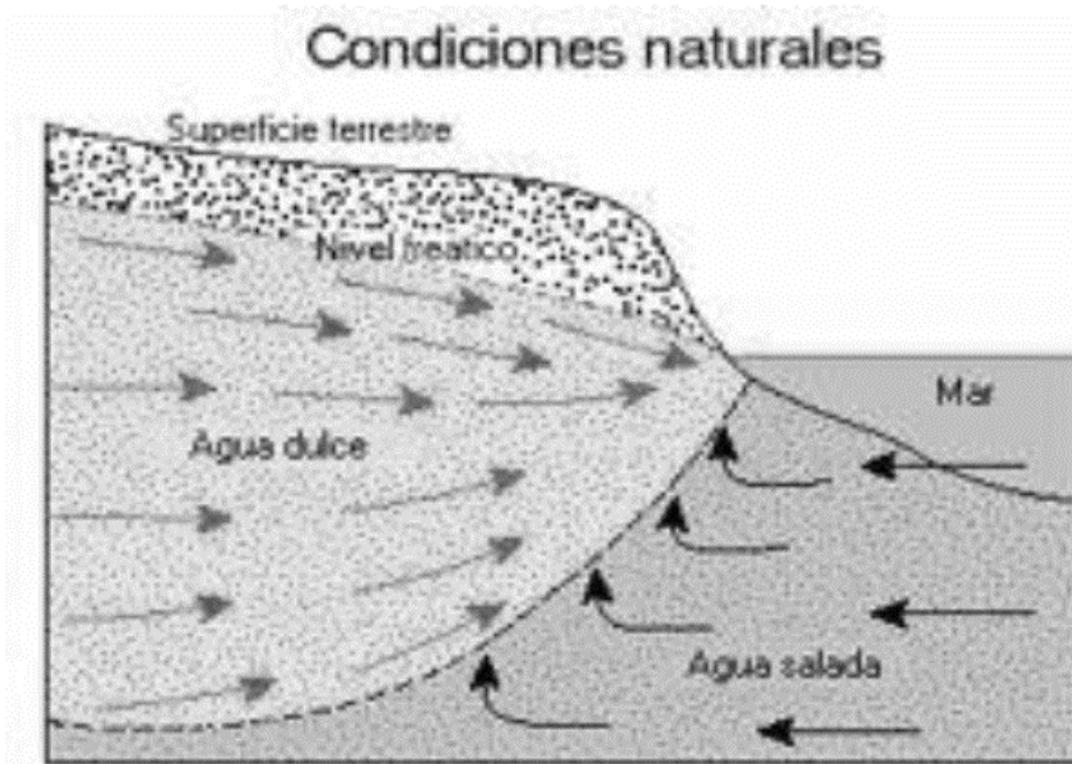
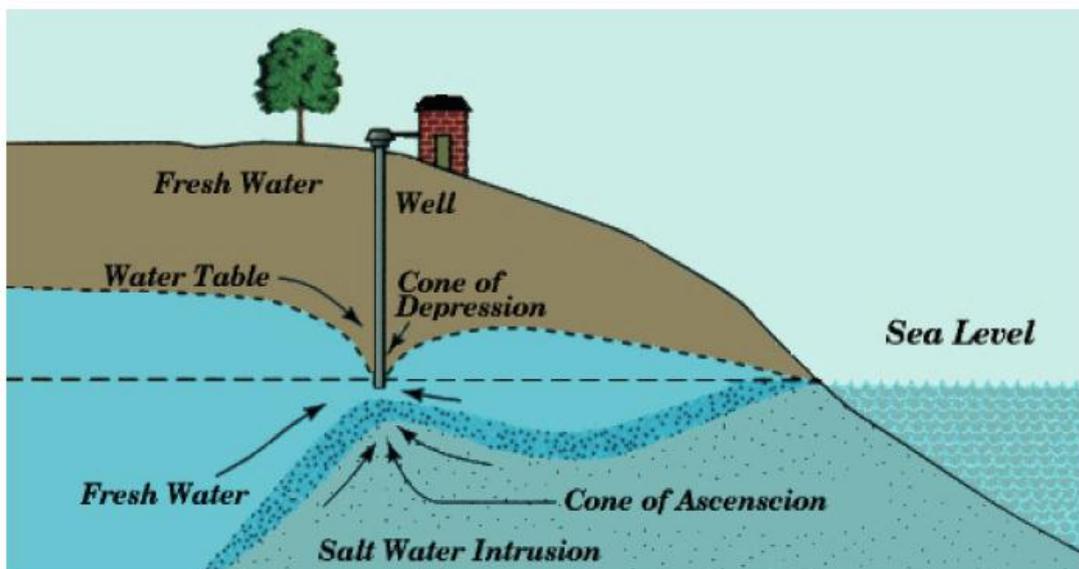


Figura 14: Intrusión Salina

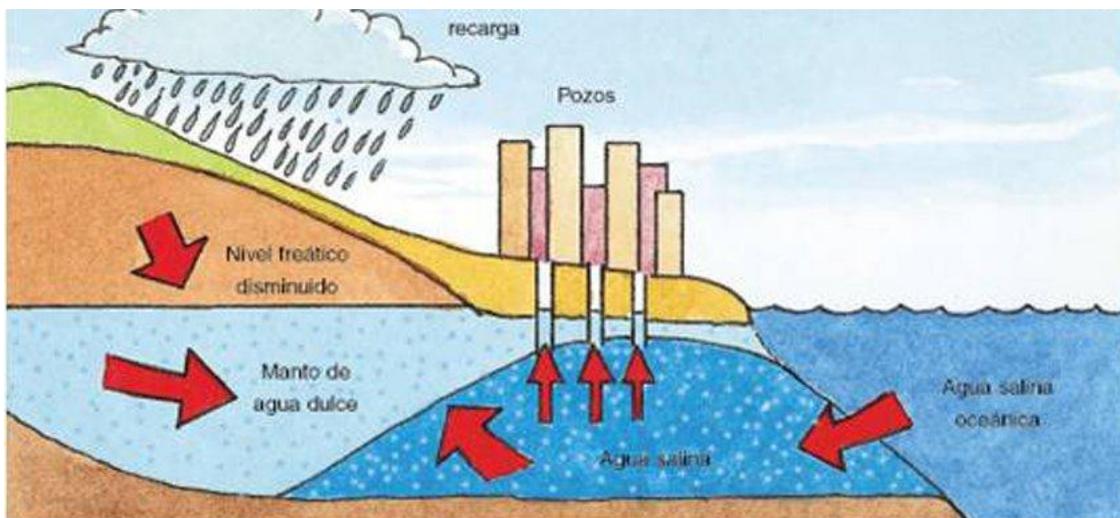


La causa principal de la intrusión salina es la sobreexplotación del recurso hídrico. Este es un tipo de contaminación de un acuífero muy común en áreas costeras de alta densidad poblacional que dependen del agua subterránea para sus necesidades de consumo de agua (Terán,2018).

La salinización de un acuífero es un proceso lento, que empieza a mostrarse cuando se llega a un punto crítico en el cual el nivel de consumo de agua supera el nivel de recarga del acuífero, es en este punto que la salinización se vuelve inevitable. De esta manera, si se extrae toda el agua dulce, el agua salada toma el espacio que esta ocupaba en el acuífero y este se vuelve extremadamente difícil de recuperar (Terán,2018).

Vulnerabilidad de los acuíferos en áreas costeras.

Figura 15: Acuífero Costero



El proceso de intrusión salina es diferente a los otros tipos de contaminación ya que no es vertical desde la superficie hasta el agua subterránea, sino que se produce lateralmente. Por esta razón es muy difícil calcular el nivel de vulnerabilidad de un acuífero a la intrusión salina. Los métodos para calcular la vulnerabilidad en acuíferos en la actualidad solo toman en cuenta la contaminación que podría producirse verticalmente.

Así, para calcular el nivel de vulnerabilidad a la intrusión salina debe usarse variantes a los métodos tradicionales (Terán,2018).

Uno de estos métodos para calcular la vulnerabilidad del acuífero a la intrusión salina es el método SEA-Gindex. Este método se basa en una multiplicidad de variables como son:

- La distancia del acuífero a la costa. (Mientras más cercano al mar existe mayor vulnerabilidad)
- La altura piezométrica del acuífero.
- Litología del terreno

Figura 16: Tabla método SEA- Gindex

h >10	10 > h > 5	5 > h > 2.5	2.5 > h > 1	h < 1	Nivel piezométrico (m)																				
0,3	0,6	0,8	0,9	1																					
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tbody> <tr> <td>Loess</td> <td>Arenas eólicas</td> <td>Gravas y arenas</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Areniscas</td> <td>Calizas</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rocas de baja permeabilidad</td> <td>Rocas Volcánicas</td> <td>Karst</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>0,3</td> <td>0,6</td> <td>0,8</td> <td>0,9</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>					Loess	Arenas eólicas	Gravas y arenas				Areniscas	Calizas			Rocas de baja permeabilidad	Rocas Volcánicas	Karst			0,3	0,6	0,8	0,9	1	Litología
Loess	Arenas eólicas	Gravas y arenas																							
	Areniscas	Calizas																							
Rocas de baja permeabilidad	Rocas Volcánicas	Karst																							
0,3	0,6	0,8	0,9	1																					
d > 10	10 > d > 6	6 > d > 3	3 > d > 1.5	d < 1.5	Distancia al mar (km)																				
0,2	0,4	0,7	0,9	1																					
V < 0,3	0,3 < V < 0,5	0,5 < V < 0,7	0,7 < V < 0,9	0,9 < V < 0,1	Vulnerabilidad intrusión marina																				
insignificante	baja	moderada	alta	extrema																					

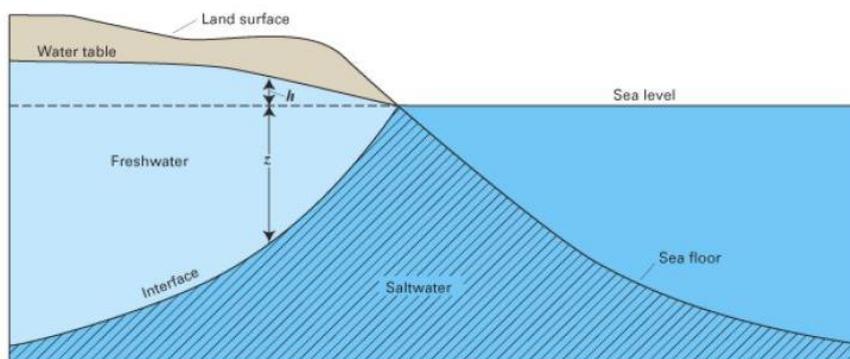
Fuente: (Terán, 2018)

Comportamiento hidrológico de la intrusión salina.

Tomando en cuenta que la infiltración de agua salada en un acuífero se produce debido a la diferencia entre las densidades entre el agua dulce y el agua salada en acuíferos cercanos al mar. Se deduce que este fenómeno se da cuando el nivel del mar se eleva o cuando el nivel freático en el acuífero se reduce. De este modo si existe un equilibrio entre los niveles de agua dulce y salada se reducen las posibilidades de la salinización de un acuífero. Este equilibrio es directamente proporcional al caudal de agua dulce que se transfiere al mar (Terán,2018).

De esta manera en 1901 Ghyben-Herzberg logra elaborar una fórmula que intenta explicar el equilibrio entre los niveles de agua dulce y salada en los acuíferos costeros:

Figura 17: Equilibrio niveles freáticos en acuífero costero



$$z = \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} h$$

Fuente: (Scanlon, Healy, & Cook, 2002)

En esta formulación:

- Z es el espesor de agua dulce bajo el nivel del mar

- H es el espesor de la zona saturada de agua dulce sobre el nivel del mar
- ρ_f es la densidad del agua dulce
- ρ_s es la densidad del agua salada

Para simplificar esta ecuación se toma en cuenta condiciones estándar con respecto a la densidad del agua dulce (1 gr/cm³), la densidad del agua salada (1,025 gr/cm³) y a una temperatura de 20°C. De esta manera la ecuación se convierte en:

$$z = 40h$$

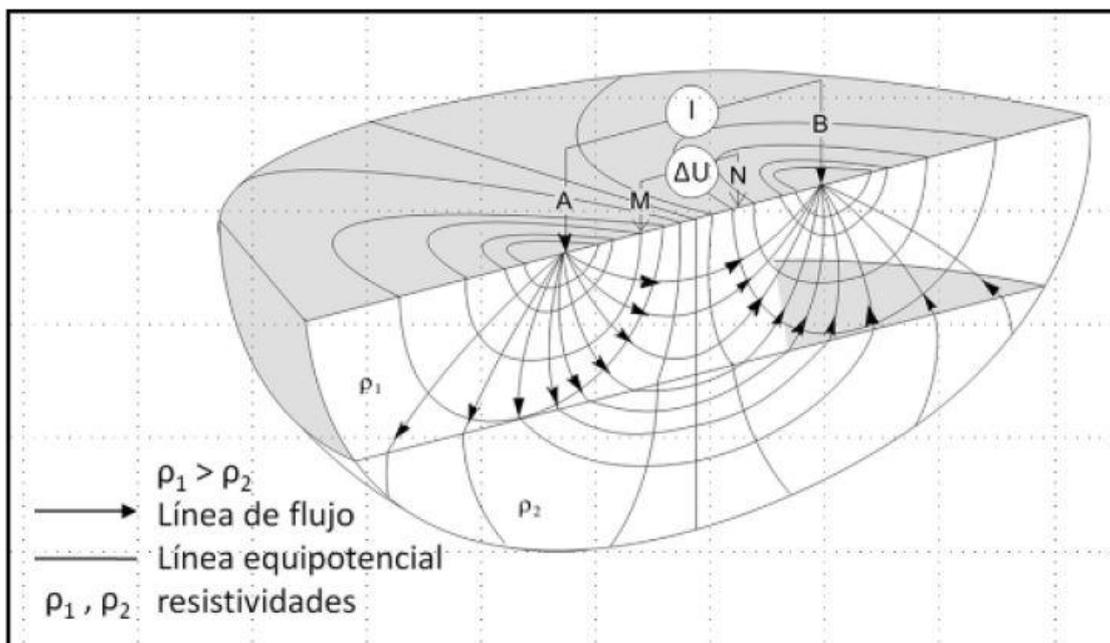
Como se puede observar, bajo condiciones estándar la carga piezométrica del agua salinizada es 40 veces mayor que la energía del agua dulce.

Debido a que la energía del agua salada es mucho mayor a la del agua dulce el fenómeno de salinización es muy común en acuíferos costeros. Hay que tener en cuenta que por cada metro de agua dulce bombeada el espesor de la zona saturada de agua salada por debajo del nivel del mar aumenta 40 metros (Terán,2018).

Para detectar que existe un problema de intrusión salina en un acuífero costero se pueden utilizar diferentes métodos como:

- **Método físico:** Se lo realiza realizando un análisis piezométrico al acuífero
- **Método geofísico:** Requiere un mayor nivel de técnica. Se realizan tomografías o SEV al acuífero.

Figura 18: Tomografía de un acuífero



Fuente: (Terán, 2018)

- **Método hidro geoquímico:** Este método se realiza haciendo un análisis químico y geológico de varios parámetros. Este análisis químico debe tomar en cuenta factores como:
 - La naturaleza y la estructura de los materiales que atraviesan el acuífero.
 - Los procesos físicos y químicos que se desarrollan tanto en la zona saturada como en la zona no saturada.
 - El tiempo de permanencia del agua debajo de la superficie del terreno
 - Existencia de yacimientos de minerales en los alrededores
 - Posible mezcla de diferentes tipos de agua
 - Contaminación física o química debido a actividades humanas

Así la salinidad del agua puede ser modificada por diferentes factores que se deben a las características morfológicas del acuífero. El método hidrogeoquímico toma en cuenta todas estas variables posibles, para determinar cuál es la causa de la modificación en la salinidad del agua. Entre las diferentes causas de modificación están:

1. **Superficie de contacto:** La superficie de contacto y el nivel de rugosidad de esta influyen en la velocidad de disolución de las sales ya que si el grano de estas es más fino demorará más en disolverse (Terán,2018).
2. **Tiempo de contacto:** El tiempo de contacto influye en el equilibrio que existe entre la roca del acuífero y el agua. El tiempo de contacto es mayor con la profundidad y menor con la permeabilidad (Terán,2018).
3. **Longitud de trayecto recorrido:** A mayor longitud de trayecto existe un mayor tiempo de contacto con la roca y por lo tanto también influye en el equilibrio existente entre el acuífero y la roca (Terán,2018).
4. **Concentración de sales:** Las sales de mayor concentración se disuelven de manera más fácil que aquellas que disminuyen su concentración debido a la roca (Terán,2018).
5. **Temperatura:** La temperatura es un factor importante para tener en cuenta ya que esta influye en la solubilidad de las sales. Una mayor temperatura acelera el proceso de disolución de las sales lo cual también acelera el proceso de salinización (Terán,2018).
6. **Presión:** El aumento de presión influye en el ritmo de disolución de las sales de calcio (Terán,2018).

7. Procesos físicos y químicos que se dan en las zonas saturadas y no saturadas.

- **Métodos Isotópicos:** Este tipo de métodos utilizan técnicas nucleares en las cuales los isótopos tanto estables como radioactivos sirven para conocer y analizar los movimientos del agua durante el ciclo hidrológico. (Terán,2018).

Los isótopos son átomos de un elemento que contienen el mismo número de protones. Sin embargo, el número de neutrones en ellos varía y, por lo tanto, su masa también. Así en este método se utilizan isótopos estables que son aquellos que no se desintegran en forma espontánea, sino que se tardan miles de millones de años. Gracias a estos isótopos estables se puede determinar el origen de los solutos (Terán,2018).

Por otro lado, este método también utiliza isótopos inestables. Este tipo de isótopos al contrario de los estables se desintegra emitiendo partículas alfa, beta y gamma. Estas partículas dejan rastro y debido a esto se puede utilizar estos isótopos para determinar la edad de la materia (Terán,2018).

Este método tiene varias ventajas debido a que permite tener información sobre las aguas de recarga del acuífero su edad y su origen (Se puede analizar con mayor profundidad el ciclo hidrológico). Además, se pueden analizar las interconexiones que tiene el acuífero con otros cuerpos de agua como ríos y otros flujos de agua superficial. Adicionalmente, puede analizar la hidrodinámica del acuífero y las mezclas de aguas de diferentes orígenes, el grado de intrusión salina del acuífero y la vulnerabilidad de este ante este fenómeno (Terán,2018).

Pozos de agua

Un pozo es una obra de captación de agua que actúa de forma vertical, esta tiene un diámetro mucho menor que su profundidad. Tiene como fin aprovechar el recurso contenido en diversos tipos de cuerpos de agua subterránea. Así, el agua obtenida de la fuente llega a nivel del terreno por medio de bombeo (manual o automático). Existen dos tipos de pozo los profundos y los de menor profundidad o someros (Chico, 1977).

- Pozos someros: Son pozos de poca profundidad, este tipo de pozos no necesitan mucha tecnificación para su construcción y su costo es muy bajo. Son utilizados para extraer el recurso hídrico de aguas subterráneas superficiales.
- Pozos profundos: Este tipo de pozo es una captación vertical revestida. En esta se utiliza bombeo generalmente centrifugado. Se lo utiliza para extraer el recurso hídrico a mayor escala y de una fuente que puede ser más profunda.

Además, se puede clasificar el tipo de pozo mediante el método constructivo del mismo. De acuerdo con esta clasificación tenemos:

- Pozo excavado: Su proceso de construcción es rudimentario. Se utilizan picos, palas o pequeña maquinaria de excavación como cucharones de arena.
- Pozo taladrado: Es aquel cuya excavación se realiza con ayuda de taladros rotatorios
- Pozo de chorro: Es aquel cuya excavación se da mediante las altas presiones de agua en forma de un chorro a alta velocidad.

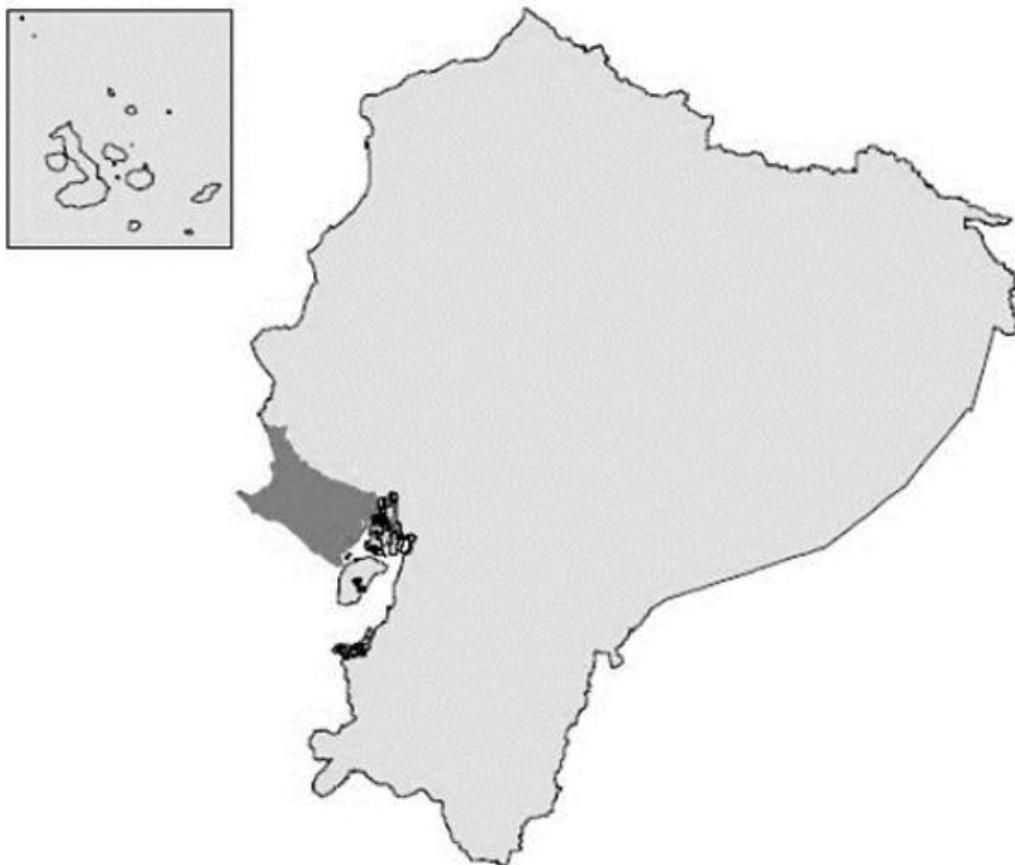
- Pozo Hincado: Este tipo de pozo se lo construye clavando una rejilla con punta en el terreno. A medida que esta rejilla penetra se agregan secciones de tubos enroscados
- Pozo perforado: Es aquel cuya excavación se la realiza mediante sistemas de rotación.

METODOLOGÍA

Ubicación

La península de Santa Elena se encuentra ubicada al Oeste del Ecuador en la región costa. Esta provincia cuenta con una extensión de aproximadamente $3\,700\text{ km}^2$ y esta subdividida en tres cantones: La Libertad, Salinas y Santa Elena. Esta provincia cuenta con 308700 habitantes conforme con el censo realizado en 2010. Según datos del INEC el 44.8% de esta población vive en zonas rurales. Santa Elena es el cantón más extenso de la provincia además de ser el más poblado con aproximadamente 144000 habitantes que habitan en la zona rural en su mayoría.

Figura 19: Ubicación zona de Estudio



Fuente: (CISPDR, 2016)

Los cantones de La libertad y Salinas cuentan con un servicio de agua potable por fuente superficial. Este estudio se enfoca en el cantón de Santa Elena, este cantón también cuenta con un servicio de agua potable por fuente superficial para su área urbana, sin embargo, el área rural debe ser abastecida por otras fuentes.

Análisis Poblacional

El análisis poblacional es fundamental para evaluar el consumo de agua en un sector. Esto, debido a que la demanda del recurso hídrico estará dada en función del tamaño y características de la población. Por esta razón se vuelve necesario proyectar o estimar el tamaño de la población en un futuro, para asegurar que el recurso hídrico podrá abastecer a dicha población por lo menos durante el período de diseño de la infraestructura que se plantea (López, 1995).

El período para el cual se intentará diseñar la estructura varía en dependencia del tipo de infraestructura a analizar. En este caso se analizará la población para un período de 20 años ya que se trata de una fuente de agua subterránea.

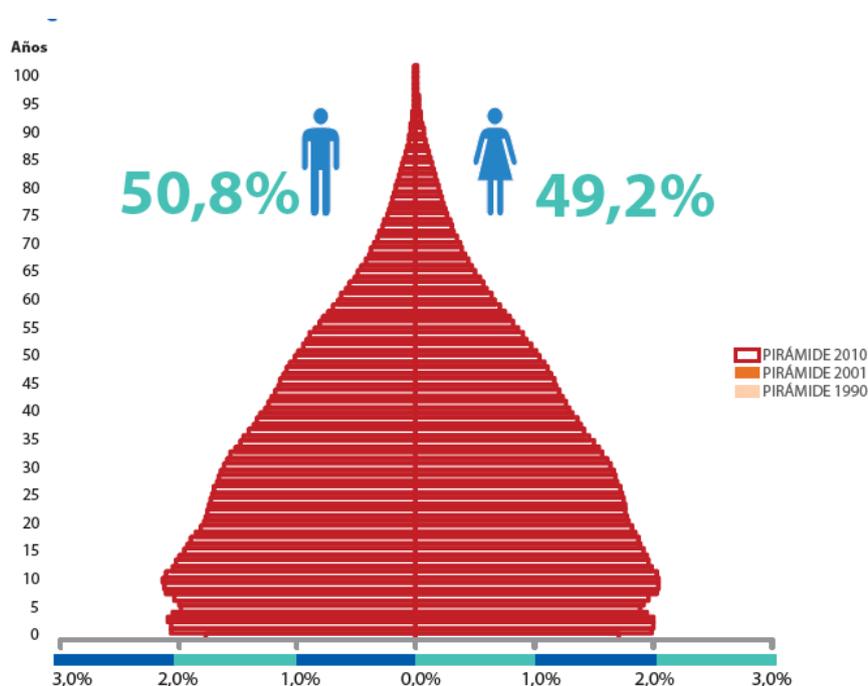
Figura 20: Mapa Político de Santa Elena



Fuente: (IGM)

El censo de 2010 nos muestra a una provincia con una edad promedio de 22 años y una estructura piramidal. Esto indica que la población es joven y es un indicativo del tipo de crecimiento de la población de esta provincia. Sin embargo, también se observa la tendencia de esta pirámide a reducir su base ralentizando el crecimiento poblacional. Se observa también que el porcentaje de géneros es prácticamente igual, lo cual indica que no existe un desequilibrio poblacional por género.

Figura 21: Pirámide poblacional provincia de Santa Elena



Fuente: (INEC,2010)

En el caso del cantón Santa Elena el enfoque de la población a analizar es la población rural dado que la población urbana en la cabecera cantonal del mismo nombre tiene acceso al agua potable de una fuente superficial. Por esta razón se analizarán datos de las poblaciones de Chanduy, Manglaralto, San José de Ancón, Simón Bolívar, Atahualpa y Colonche.

Se procedió a realizar un análisis que muestre como fue el crecimiento intercensal del período entre 1990-2001 y cómo se comporta con respecto al crecimiento intercensal del período del 2001-2010. Para esto se obtuvo el porcentaje de crecimiento de la población entre los dos períodos aplicando la siguiente ecuación:

Ecuación 1: Porcentaje de crecimiento entre censos

$$\% \text{crecimiento intercensal} = \frac{(P_{final} - P_{inicial})}{(P_{inicial})} * 100$$

Los datos iniciales para este análisis fueron:

CENSO	POBLACION REGISTRADA
2010	144076
2001	111671
1990	84010

Tabla 1: Datos iniciales población rural Santa Elena

De la misma se obtuvo:

PERIODO	DIFERENCIA DE POBLACION
1990-2001	32405
2001-2010	27661

Tabla 2: Diferencia de población entre censos

PERIODO	% CRECIMIENTO INTERCENSUAL	% CRECIMIENTO ANUAL
1990-2001	29%	3.22%
2001-2010	33%	2.99%

Tabla 3: Porcentajes de crecimiento población

Por esta razón, para analizar el crecimiento poblacional hasta el año 2040 se utilizó un tipo de crecimiento geométrico en base a que la tasa de crecimiento entre los censos de 1990 y 2001 y la tasa de crecimiento entre los censos de 2001 y 2010 es similar siendo de 33% y 29% respectivamente y la población aumenta de manera proporcional a la población existente.

De esta manera se procedió a calcular una predicción de la población en 2040 con base a un promedio entre el crecimiento que existió entre los dos censos. A partir de la siguiente ecuación

Ecuación 2: Constante de cambio poblacional por método geométrico

$$\frac{dP}{dT} = K't$$

En este caso entre los dos censos se registraron aumentos en la población del 33% y 29% en sus respectivos períodos. Esto se tradujo a una tasa de crecimiento anual de la población (r) de 3.2% y 3% respectivamente. De estas se tomó un promedio para realizar la predicción de la población hasta el 2010.

r_1	3.2%
r_2	3.0%
$r_{promedio}$	3.1%

Tabla 4: Tasas de aumento anual de la población cantón Santa Elena

Se registraron los siguientes datos iniciales:

GAD	AÑO:2010	POBLACIÓN			DENSIDAD POBLACIONAL		
		URBANA	RURAL	TOTAL	URBANA	RURAL	TOTAL
MUNICIPAL	AREA KM2						
SANTA ELENA	3660	53174	90902	144076	912.22	1595.96	39.37

Tabla 5: Datos Iniciales de población cantón Santa Elena

Para realizar la predicción de la población se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 3: Método geométrico proyección de la población

$$P = P_0(1 + r)^n$$

En esta ecuación:

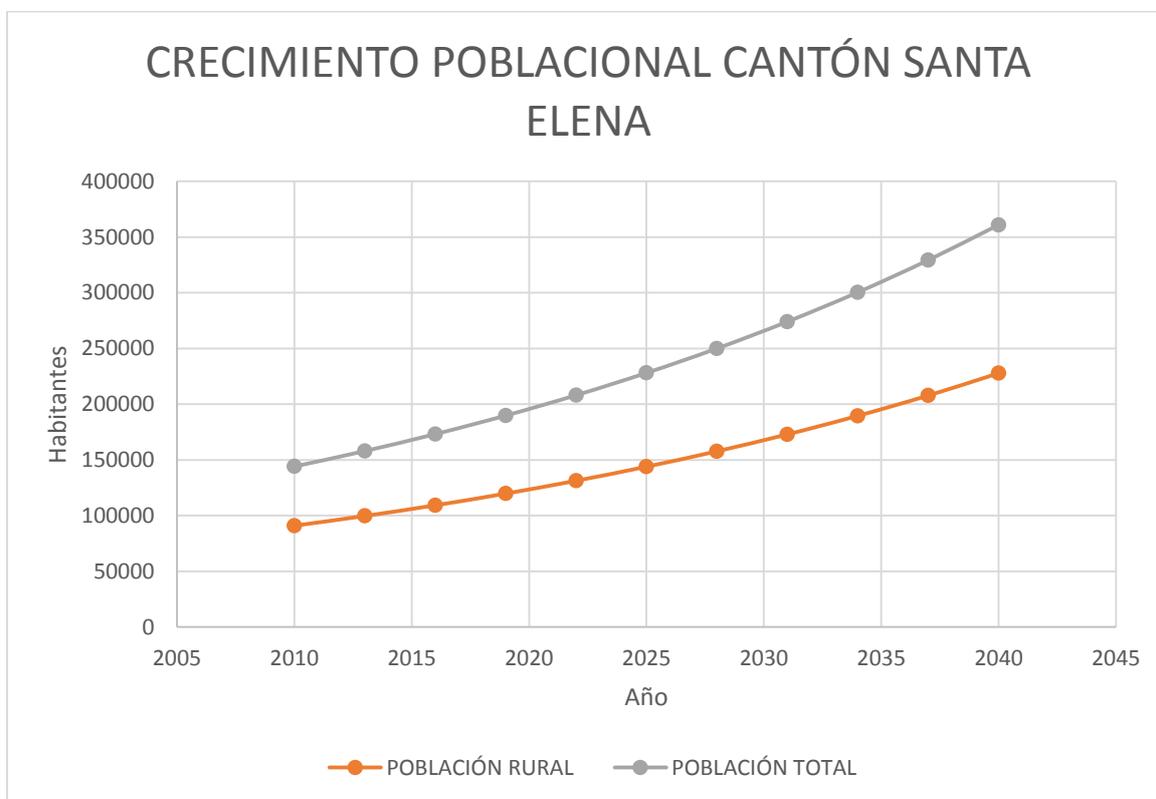
- P_0 es la población inicial
- r es la tasa anual de crecimiento poblacional promedio
- n es el número de años

Se realizaron mediciones en intervalos de 3 años para lograr una mayor exactitud.

MÉTODO GEOMÉTRICO	POBLACIÓN		
AÑO	URBANA	RURAL	TOTAL
2010	53174	90902	144076
2013	58289	99646	157935
2016	63896	109231	173127
2019	70042	119738	189780
2022	76780	131256	208036
2025	84165	143882	228047
2028	92261	157722	249984
2031	101136	172894	274030
2034	110864	189525	300389
2037	121529	207756	329285
2040	133219	227740	360959

Tabla 6: Estimación de la población en Santa Elena

Figura 22: Crecimiento poblacional cantón Santa Elena.



La Tabla No. 8 y la figura No. 22 nos muestran que el cantón presenta un crecimiento demográfico constante y que habría que abastecer de agua potable a aproximadamente 227740 personas por medio de diversas fuentes subterráneas.

Análisis uso del recurso hídrico actual en Santa Elena

El uso del recurso hídrico en el país se encuentra amparado por la Constitución. El uso del recurso hídrico depende de diversos factores como: la ubicación, el tipo de fuente de agua a usarse, la calidad del agua y además de si el uso de del recurso hídrico se dará de manera consuntiva o no consuntiva. (SENAGUA,2016).

El uso consuntivo del agua es aquel que extrae el agua de una fuente hídrica para poderla consumir en cualquier área; por ejemplo, el suministro de Agua Potable o el abastecimiento de Agua para Riego; mientras que el uso no consuntivo implica el aprovechamiento del agua y su devolución o retorno de las aguas a la fuente; por ejemplo, una hidroeléctrica, o piscicultura. En el caso de las poblaciones rurales de Santa Elena el uso del agua es consuntivo, es decir, entra en un marco de consumo para la población: uso doméstico y agricultura. La demanda de agua en este sector se derivaría por lo tanto de este tipo de actividades. Es necesario conocer la demanda de agua por habitantes para asegurar el acceso al recurso hídrico en el tiempo para estas poblaciones (SENAGUA,2016).

Demanda hídrica

La demanda de agua se calcula por el método de dotaciones. La SENAGUA en su Manual Técnico de Procedimiento Para la Elaboración de Informes Técnicos de Sustentación Para Las Resoluciones de Autorización del Derecho de Uso y aprovechamiento del agua ha venido realizando cálculos de la demanda aproximada de agua. La demanda por persona depende de si la dotación se realizará en un área rural o urbana, el número de comercios, tipo de viviendas, etc.

Figura 23: Dotación de agua para consumo doméstico

Categoría		Unidad	MTP valor recomendado	2010	2025	2035
Costa	Guayaquil	l/hab/día	250-300	280	290	300
	Urbana	l/hab/día	250-300	250	260	270
	Rural	l/hab/día	200	180	190	200
Sierra	Capital	l/hab/día	250-300	250	260	270
	Cabecera cantonal	l/hab/día	150-200	150	160	170
	Rural	l/hab/día	80-100	85	90	100
Amazonía	Urbana	l/hab/día		250	260	270
	Rural	l/hab/día		180	190	200

Fuente: (CISPDR, 2016)

Cabe recalcar, que el consumo de agua no es igual a la demanda de agua. Esto es debido a que la última ha de calcularse considerando pérdidas de agua; ya que se refiere al agua total necesaria para abastecer el consumo de una población en particular.

Según la Figura No. 23 la demanda hídrica actualmente en estos cantones sería de aproximadamente 180 l/hab/día y se incrementaría a 200 l/hab/día hasta el año 2035. Esta demanda representa la dotación de agua para uso doméstico para estas poblaciones.

En la provincia existe también demanda de agua para actividades agropecuarias., esta demanda es actualmente baja ya que este tipo de actividad ha disminuido en los últimos años. Sin embargo, de acuerdo con el Plan Nacional de Buen Vivir se planea aumentar esta producción, e incrementar hasta 3628 hectáreas de cultivos en esta zona que en la actualidad cuenta con 402 hectáreas de cultivo.

A continuación, se realiza un análisis de la demanda promedio de agua de uso doméstico en las poblaciones rurales del cantón Santa Elena hasta el año 2040. Esto con el fin de corroborar las dotaciones por habitante propuestas en la Figura No. 23.

Según la CEPAL el porcentaje de pérdidas en Ecuador es muy alto. A nivel nacional se estima que el promedio de pérdidas de agua es del 42%, mientras que, en Guayaquil, así como en ciudades similares de la costa este es de aproximadamente el 61%. Para esta investigación, debido a que el caso de estudio se encuentra en la costa se asumirá un porcentaje de pérdidas de 60% (CEPAL, 2012).

Análisis Demanda Actual

Para el cálculo de demanda actual se determinó el porcentaje de cambio en el consumo analizando las demandas hídricas actuales y futuras que se estimaron en el Plan de la Demarcación Hidrográfica Guayas

De esto se obtuvo lo siguiente:

Unidad Hidrográfica	DEMANDA HÍDRICA USO DOMÉSTICO $hm^3/año$		
	2010	2025	2035
JAVITA	20.94	49.34	63.88

Tabla 7: Proyecciones de Consumo Grupo Hídrico Javita Fuente: (CISPDR, 2016)

La Tabla No.7 muestra las proyecciones de demanda hídrica de uso doméstico para la unidad hidrográfica Javita según un estudio realizado por la CISPDR. Esta demarcación contiene al área de estudio, por lo tanto, resulta relevante para conocer la diferencia anual promedio de crecimiento de consumo con respecto a la población

	2010	2025	2035
POBLACION	308693	488607	663614
HM/(DIA)	0.05736	0.13517	0.17501
HM/DIA/HAB	1.85848E-07	2.7666E-07	2.63728E-07
L/DIA/HAB	185.85	276.66	263.73

Tabla 8: Proyecciones consumo L/ (hab/día) Grupo Hídrico Javita

La Tabla No. 8 nos muestra una proyección de poblaciones estimadas para esta región. A partir de las poblaciones estimadas calculadas para la Unidad Hidrográfica Javita se procede a calcular el consumo en L/día/hab en función de estas.

PERIODO AÑOS	DIFERENCIA PORCENTUAL	DIFERENCIA PORCENTUAL ANUAL
15	136%	9%
10	29%	3%
DIFERENCIA % ANUAL PROMEDIO		6%

Tabla 9: Porcentaje de consumo anual Grupo Hídrico Javita

A partir de esto, se calculó la diferencia porcentual anual promedio para la Unidad Hidrográfica Javita. De esto se calculó la diferencia porcentual de consumo entre períodos y a partir de esto se obtuvo una diferencia anual promedio entre demandas de consumo de 6% tal como se muestra en la Tabla 10. Este porcentaje se utilizó en la estimación de la demanda de consumo de uso doméstico del sector. A partir de este análisis se realizó el cálculo de demandas domésticas para las poblaciones rurales del cantón Santa Elena.

Los resultados son los siguientes:

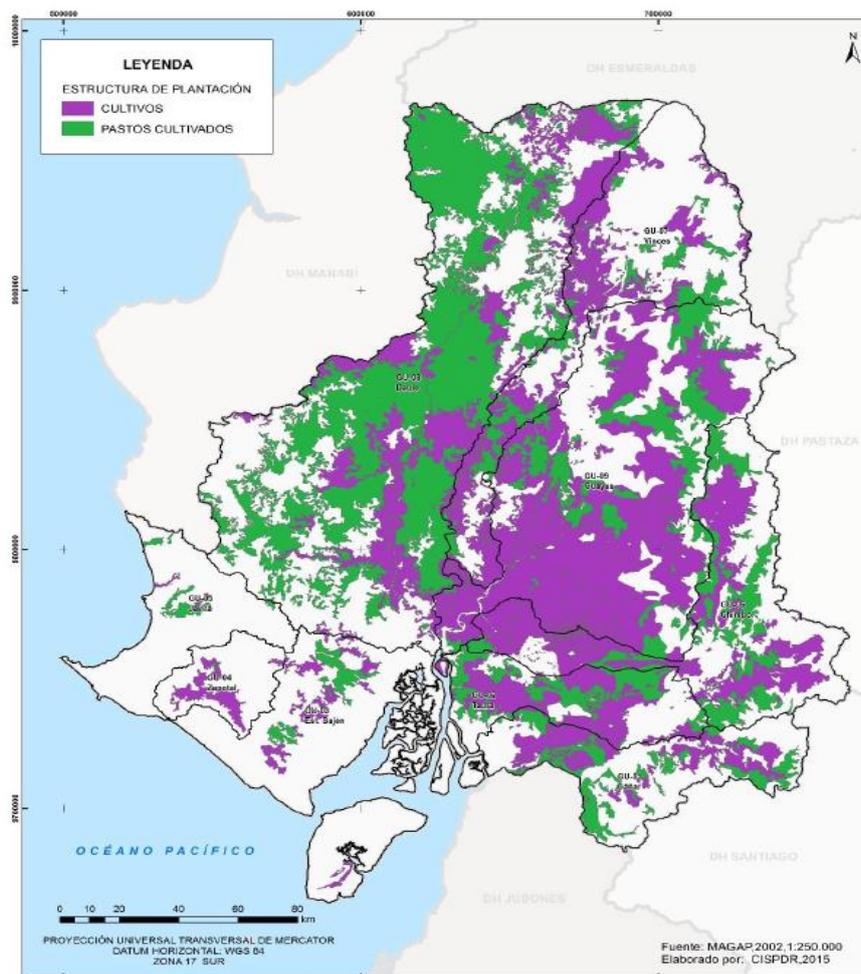
AÑO	POBLACIÓN RURAL hab	ΔPOBLACIÓN %	Δ CONSUMO %	CONSUMO RURAL FINAL l/hab/día	PÉRDIDAS 60% l/hab/día	DEMANDA TOTAL l/hab/día
2010	90902			113	67.8	181
2013	99646	9.619	0.866	114	68.4	182
2016	109231	9.619	0.866	115	69.0	184
2019	119738	9.619	0.866	116	69.6	186
2022	131256	9.619	0.866	117	70.2	187
2025	143882	9.619	0.866	118	70.8	189
2028	157722	9.619	0.289	118	71.0	189
2031	172894	9.619	0.289	119	71.2	190
2034	189525	9.619	0.289	119	71.4	190
2037	207756	9.619	0.289	119	71.6	191
2040	227740	9.619	0.289	120	71.8	192

Tabla 10: Proyección Demanda Promedio de agua en el área rural del cantón Santa Elena

Como se puede observar, se registraron demandas totales l/hab/días ligeramente menores a las que ha venido calculando la SENAGUA. Por lo tanto, para los próximos cálculos se tomará en cuenta desde el año 2035 los valores mostrados en la Figura No. 23.

Así mismo se procedió a calcular la demanda de agua de riego en la zona rural del cantón Santa Elena. La zona en donde se encuentra el acuífero Atahualpa y que debe ser abastecida de agua de cultivo cuenta en la actualidad con 1150 hectáreas de suelo que es usado para fines agrícolas. El área en cuestión no tiene como principal actividad económica la agricultura, esto también se debe a la falta de recurso hídrico en la zona.

Figura 24: Distribución Zona de Cultivos DH Guayas



Fuente: (CISPDR,2016)

La cantidad de agua que se necesita por hectárea se toma en base a un modelo realizado por CISPDR que se efectuó en un área de clima y condiciones similares al sur de China según el cual se necesitan aproximadamente $7500 \text{ m}^3/\text{ha}$ al año para satisfacer la demanda agrícola., equivalente a 856.17 l/hora/ha .

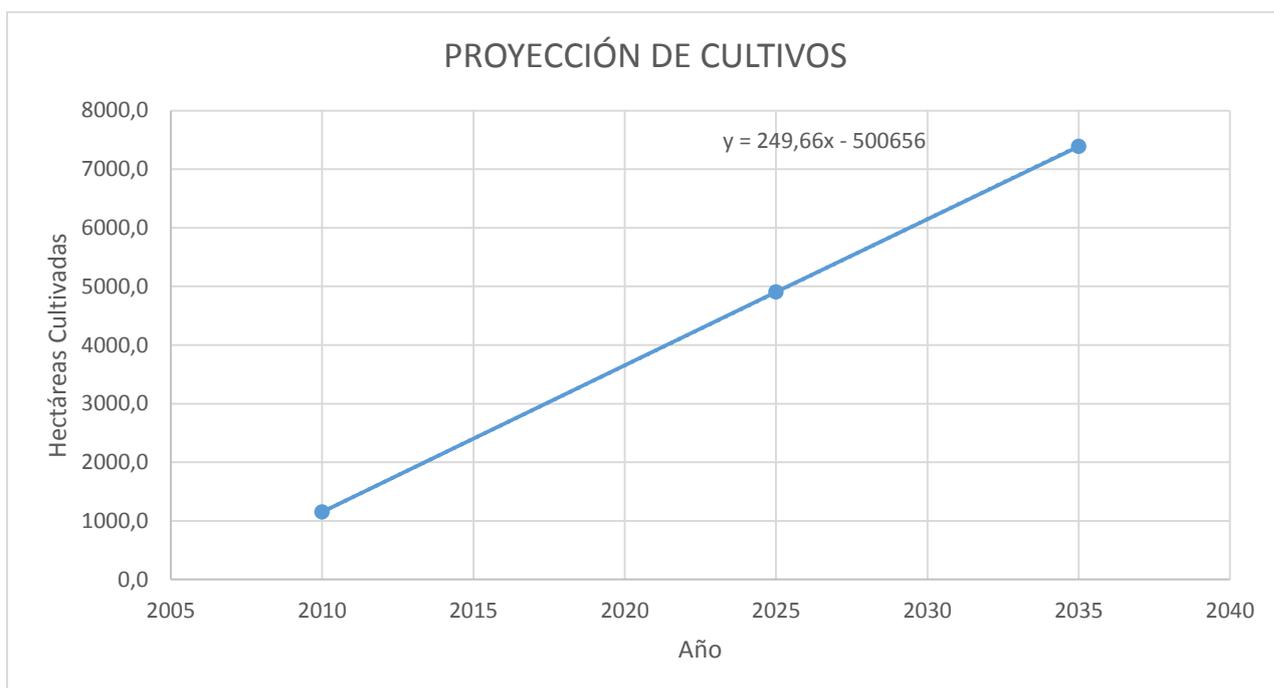
En el caso de Ecuador, el Plan Nacional del Buen Vivir resuelve que para obtener seguridad alimentaria se deberían extensificar los cultivos, es decir, incrementar el área de cultivos con el fin de obtener mayor producción (FAO, 2014).

De esta manera la planificación realizada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP) se propone un incremento de la producción agrícola que en el año 2010 estuvo alrededor de 270 kilogramos per cápita a alrededor de 480 kilogramos per cápita (CISPDR, 2016) .

El Plan Nacional del Agua, junto con el Ministerio de Agricultura y Ganadería propone un crecimiento que involucra cultivos que garantizan la soberanía y seguridad alimentaria, así como cultivos de exportación. La Figura No.25 muestra las proyecciones de este crecimiento para cumplir los objetivos propuestos para esta demarcación.

Según la CEPAL, el uso de agua en Ecuador representa aproximadamente el 80% del uso de agua total y tiene una eficiencia de alrededor del 25%, es decir, existe un 75% de pérdidas debido a la falta de tecnificación en los sistemas de riego, así como posibles fugas y otros. Sin embargo, se toma en consideración que la Provincia de Guayas y aledaños tienen una eficiencia superior al promedio del país siendo esta del 50%. Además, se estima que la eficiencia en esta zona pasará al 55% en 2025 y al 60% en 2035. Esto se utilizó para elaborar las proyecciones de demanda futura de agua de cultivo (CEPAL, 2012).

Figura 25: Proyección Crecimiento de Cultivos según MAGAP



En base a este gráfico se realizó una estimación por mínimos cuadrados mostrada en la misma Figura. Esta muestra la ecuación según la cual se calculará el incremento de área de cultivo para esta demarcación geográfica.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

AÑO	ÁREA CULTIVOS ha	Δ HA ha	CONSUMO FINAL m³/ha/año	PÉRDIDAS m³/ha/año	DEMANDA TOTAL m³/ha/año
2010	1150.0		7500	3750.0	11250.00
2013	1917.1	66.708	7500	3750.0	11250.00
2016	2663.5	38.930	7500	3750.0	11250.00
2019	3409.8	28.021	7500	3750.0	11250.00
2022	4156.2	21.888	7500	3750.0	11250.00
2025	4902.5	17.957	7500	3375.0	10875.00
2028	5648.8	15.224	7500	3375.0	10875.00
2031	6395.2	13.212	7500	3375.0	10875.00
2034	7141.5	11.670	7500	3375.0	10875.00
2035	7390.3	3.484	7500	3000.0	10500.00
2037	7887.9	6.733	7500	3000.0	10500.00
2040	8634.2	9.462	7500	3000.0	10500.00

Tabla 11: Proyección demanda Agua de Riego

Uso actual del agua subterránea en la zona

Al encontrarse en una zona semi-árida, el Cantón Santa Elena tiene un déficit hídrico que se agrava en ciertos meses del año. El agua subterránea que tiene como fuente el acuífero “Atahualpa” es la única fuente de agua para consumo humano y riego disponible en ciertas localidades.

Por esta razón, las aguas subterráneas de la zona se han venido explotando en forma de 65 pozos, en su mayoría de menos de 15 metros de profundidad, con la existencia de un solo pozo en la localidad de Río Verde de más de 65 metros de profundidad (Universidad de Memphis, 2016). Estos pozos son explotados por comunas y son administrados por las juntas de agua del sector.

Además, de estos pozos se puede decir que sus caudales de servicio son bajos rondando los 0.2-1.0 l/s. Cabe también mencionar que los pozos someros son de uso de pequeñas poblaciones y las condiciones de explotación de estos no está tecnificada ni sigue normas sanitarias (CEDEX, 1989).

Comunas son una entidad jurídica que esta normada bajo la ley de Organización y Régimen de Comunas, misma que fue aprobada en 2004. La comuna pasa a definirse en esta ley en su artículo 1 como:

“Todo centro poblado que no tenga la categoría de parroquia, que existiera en la actualidad o que se estableciere en lo futuro, y que fuere conocido con el nombre de caserío, anejo, barrio, partido, comunidad, parcialidad, o cualquiera otra designación, llevará el nombre de comuna, a más del nombre propio con el que haya existido o con el que se fundare”

Por otra parte, Juntas de Agua son una entidad que existe bajo la Ley de Aguas vigente, está normada por la Ley y Reglamentos de las Juntas de Agua Potable y Alcantarillado. Estas tienen como misión el asegurar el acceso al agua y la preservación del recurso hídrico en comunidades remotas y rurales en las cuales el control por parte de otros organismos se dificulta.

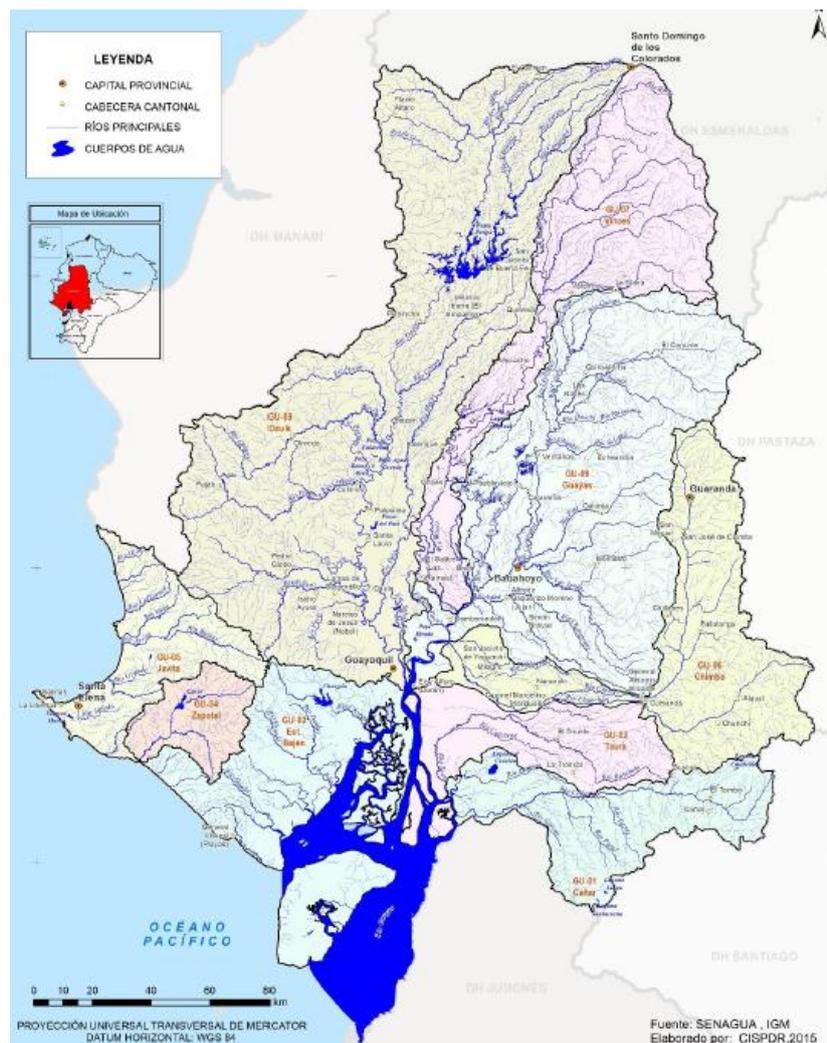
Las comunas son muy comunes en las áreas rurales, y tienen a su cargo propiedades comunales, como en este caso los pozos que explotan. Esta explotación debe ser normada y controlada por las Juntas de agua. Sin embargo, existen riesgos debido al mal manejo de las aguas ya que existe una posibilidad de contaminación física en las mismas, así como de intrusión salina en el acuífero “Atahualpa”, fuente del recurso hídrico en el sector.

Análisis Hidrológico

Fuente Hídrica

Debido a las diferentes características hidrogeológicas y geográficas del país, la SENAGUA ha dividido a este en zonas o demarcaciones según la división hidrográfica del país. La Demarcación Hidrográfica de Guayas cuenta con 44596.62 km². Esta contiene a las provincias de Guayas y Santa Elena. El acuífero “Atahualpa” se encuentra en esta demarcación, en la Unidad Hidrográfica Javita. La Unidad Hidrográfica Zapotal se encuentra al este de esta división.

Figura 26: Demarcación hídrica Guayas



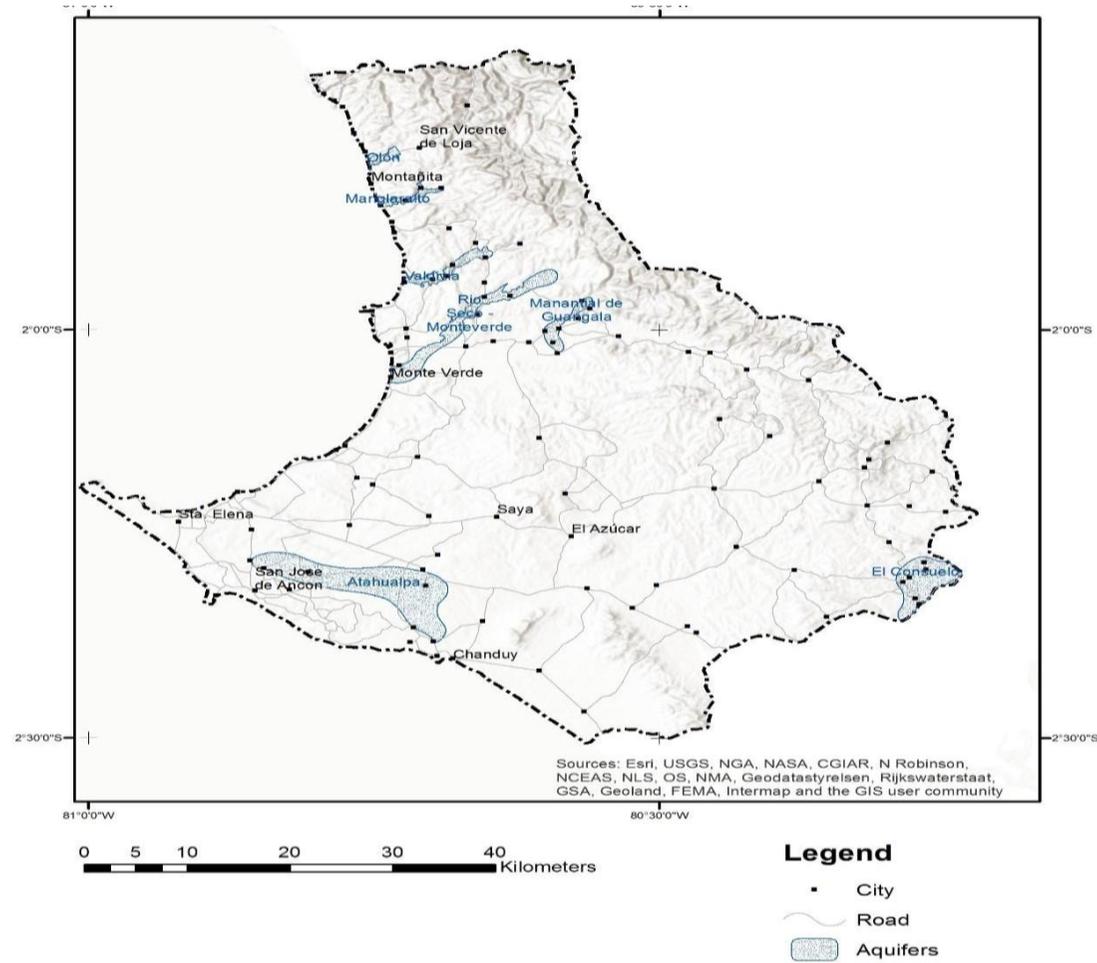
Fuente: (CISPDR, 2016)

El acuífero Atahualpa se encuentra en una zona con clima semi-árido. Las precipitaciones en este sector son de aproximadamente 300 a 700 mm al año. Además, estas precipitaciones no ocurren de manera uniforme a lo largo del año, sino que en el período de diciembre a mayo ocurre la mayoría de estas dejando a los demás meses con un gran déficit hídrico en el sector.

En los grupos hidrográficos Javita y Zapotal se encuentran cinco acuíferos aluviales: Atahualpa, El Consuelo, Guangala, Valdivia y Rio Seco-Monte Verde. Debido a la carencia de precipitaciones, y por ende a la escasez del recurso hídrico en el sector estos acuíferos se convierten en una fuente de agua para las comunidades rurales que los rodean. En la Figura No.27 se puede observar al acuífero Atahualpa al este de la provincia de Santa Elena. El acuífero Atahualpa es de especial importancia en este contexto debido a sus características hidrogeológicas como:

- Profundidad media de 7 metros
- Alta permeabilidad y porosidad
- Acuífero libre

Figura 27: Sistemas de acuíferos en la provincia de Santa Elena



Fuente: (Universidad de Memphis, 2016)

Calidad del Agua

Hacen falta estudios recientes que determinen la calidad del agua subterránea en los pozos. Sin embargo, los habitantes de las poblaciones rurales de Santa Elena han mencionado un sabor extraño en el agua de los pozos, por lo cual se presume podría existir intrusión salina en este acuífero.

Existen datos de 1989, estos mencionan que al analizarse 60 pozos de los 77 existentes en ese entonces se obtuvo resultados de sólidos totales disueltos por encima de los niveles permitidos de 1.00 mg/l en al menos 32 de los mismos. Asimismo, ya se advertía una presencia de salinidad elevada sobre todo en pozos ubicados en las regiones de Manglaralto, la cual está directamente relacionada con el acuífero “Atahualpa” (CEDEX, 1989).

Además, datos de la calidad de agua del pozo 2 de la comunidad de Manglaralto en el año muestran niveles mayores al doble de los permitidos en sólidos disueltos. Además, confirma las sospechas de alta salinidad del pozo debido a que el nivel de salinidad es casi cuatro veces mayor al permitido.

La salinidad de los pozos de esta zona puede deberse a múltiples factores, y es la amenaza de contaminación de mayor riesgo para este acuífero. Una de las causas para la presencia de este fenómeno puede ser la existencia de depósitos evaporíticos, o depósitos de sales, en el sector de Ancón. Adicionalmente, se puede mencionar como posible factor la poca infiltración de agua que recibiría el acuífero como consecuencia de escasas precipitaciones y alta evo transpiración potencial (CEDEX, 1989).

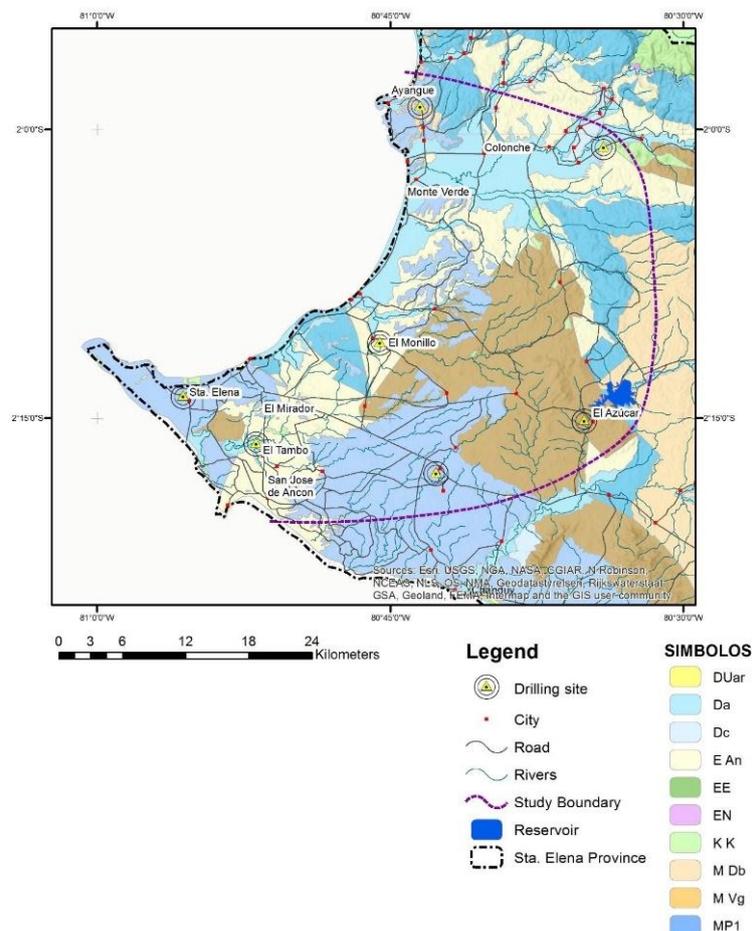
Sin dudas, este último factor es el que representa un mayor problema debido a que alertaría que la recarga del acuífero es inadecuada para los niveles de uso que se le da. No existe información sobre otros contaminantes para el acuífero.

Características del Sector

Para analizar la manera en la que se recarga un acuífero es necesario analizar la cantidad, calidad y origen de las aguas que llegan hacia este, así como la zona en la cual se produce la carga o descarga del mismo (Isaar & Lerner, 1990). Además, es importante recalcar que la mayoría de los métodos existentes para calcular la recarga de un acuífero en realidad calculan la recarga potencial de este, o en otras palabras se cuantifica la cantidad total de agua infiltrada sin tomar en cuenta que esta puede o no convertirse en nivel freático eventualmente (Scanlon, Healy, & Cook, 2002).

a) Área de interés para el estudio

Figura 28: Área de Interés para estudio acuífero Atahualpa



Fuente: (Universidad de Memphis, 2016)

El área de interés para este estudio comprende la cuenca del río Javita de un área de 813.1 km^2 y aproximadamente 349 km^2 de la cuenca del Río Zapotal que en total cuenta con un área de 1035 km^2 .

Figura 29: Ubicación De Cuencas Hidrográficas



Fuente: (Rodríguez, 2014)

b) Características del terreno

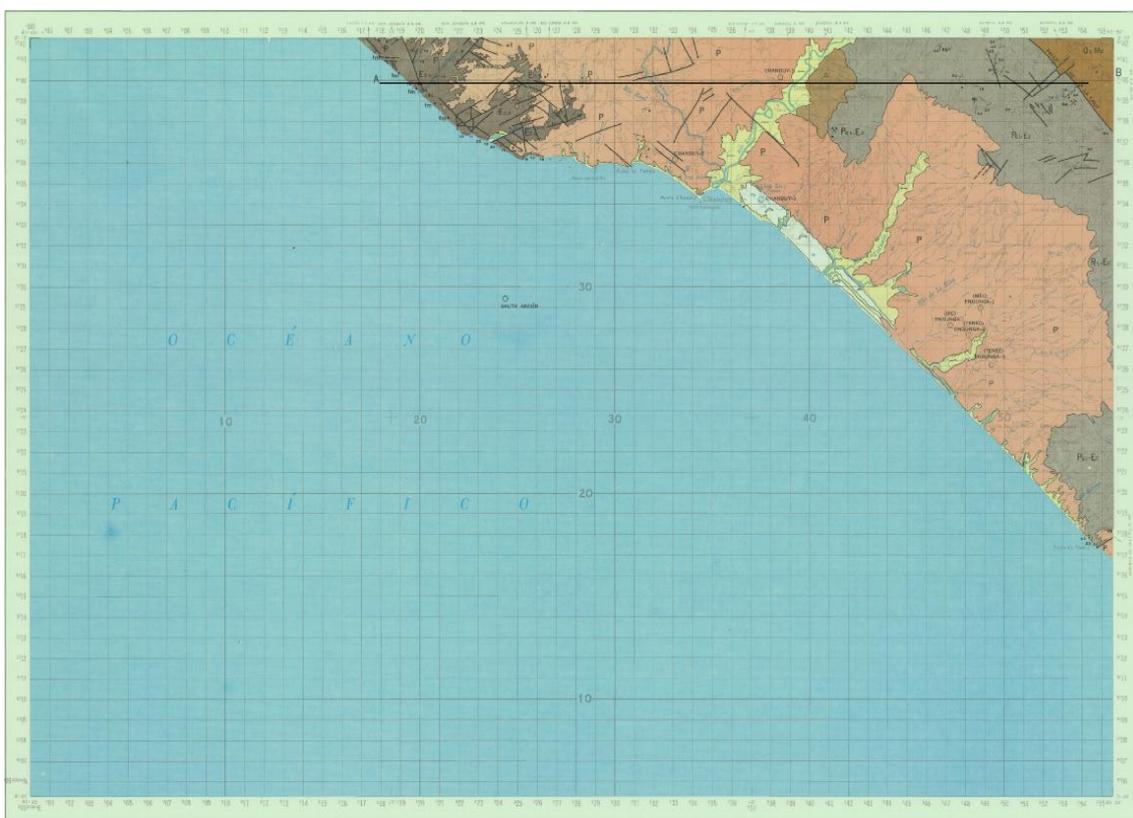
La unidad geológica o el terreno en donde se encuentra el acuífero tiene presencia de rocas del tipo oceánico. Esta zona está cerca del perfil costanero por lo cual su altitud es baja y existe presencia de arenas y areniscas. Es una zona relativamente plana con pequeñas elevaciones de hasta 300 metros de altura, siendo la altura máxima registrada en el sector la de 313msnm y la altura mínima registrada de 2msnm. (Rodríguez, 2014)

En la zona también existen rocas sedimentarias, estas mismas presentan una porosidad que propicia la existencia de acuíferos en la zona. Además de esto existe la presencia de fallas geológicas en la zona norte de esta unidad, existiendo también fallas menores al sur del mismo (CEDEX, 1989).

Existen múltiples formaciones en la unidad geológica de Santa Elena, los depósitos superficiales de suelo datan del cuaternario y es cerca de estos que existen pozos en el sector por su lito permeabilidad adecuada.

A continuación, se muestran perfiles topográficos de la zona, estos se obtuvieron del Instituto Geográfico militar:

Figura 30: Parte este de la provincia de Santa Elena

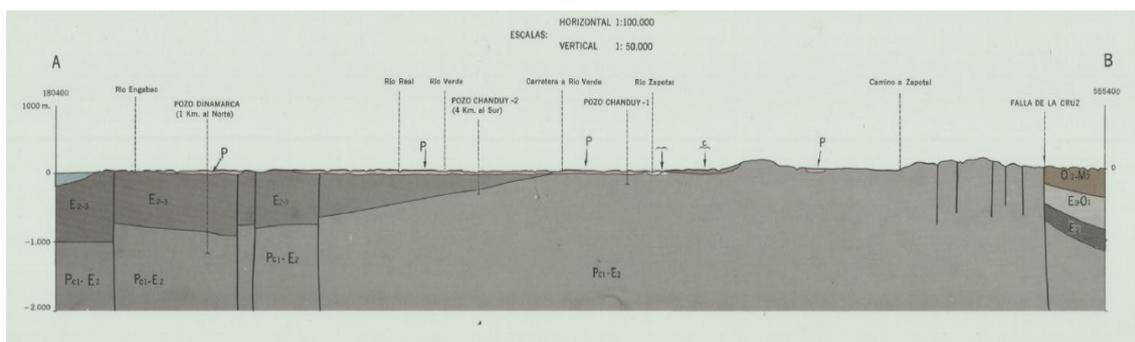


Fuente: (INIGEMM)

La línea AB es la línea sobre la cual se realizará el trazado topográfico. Se debe notar que esta línea se encuentra entre San José de Ancón y Chanduy en una zona cercana al acuífero Atahualpa por lo cual incluso se refiere a pozos de la zona.

La línea de terreno tiene la siguiente vista:

Figura 31: Perfil Geológico Línea AB



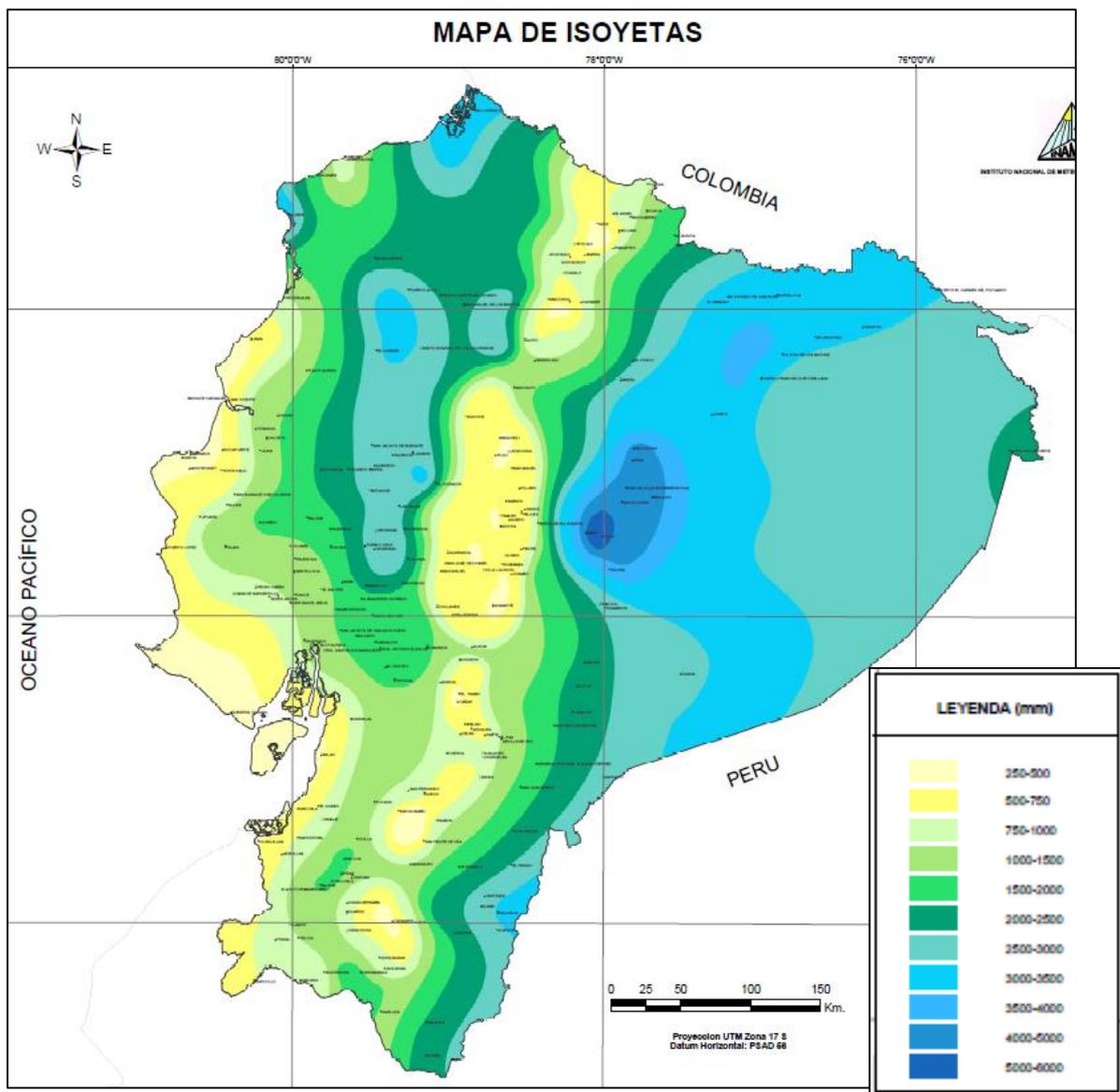
Fuente: (INIGEM)

El perfil geológico del área de Chanduy, así como el perfil geológico de áreas aledañas se caracteriza por suelo del tipo arenisca cuarzosa gruesa, además, cerca de la zona de los pozos existe presencia de arcillitas, limolitas y lutitas que datan del eoceno medio y superior.

El área de la cuenca del río Javita, por lo tanto, el terreno estará conformado por arenas y areniscas. Por otro lado, la parte este de la cuenca del Río Zapotal presenta una composición de arcillitas, limolitas y lutitas.

Así mismo, se puede observar en el siguiente mapa las características litológicas de la zona de estudio:

Figura 33: Mapa de Isoyetas República del Ecuador

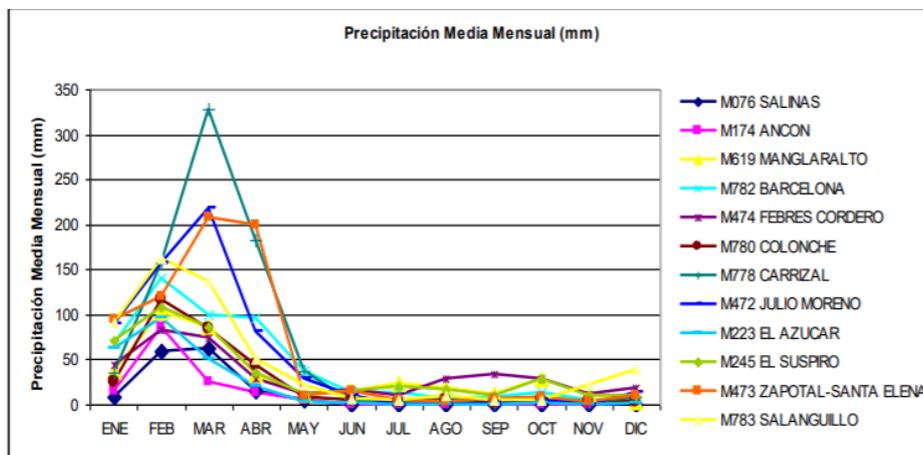


Fuente : (INAHMI, 2011)

Como se puede apreciar en la Figura No. 33 el nivel de lluvias de la zona en donde se encuentra el acuífero se encuentra en un nivel de entre 250 a 500mm anuales. Esta es una de las tasas más bajas en el país. Según datos del INAHMI esta es la distribución de las lluvias durante el año en el sector:

:

Figura 34: Distribución temporal de la precipitación en Santa Elena



Fuente: (INAHMI, 2011)

DISTRIBUCIÓN LLUVIAS (mm)											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
120	160	140	100	25	10	20	15	10	15	20	40

Tabla 12: Distribución mensual lluvias en el sector Cuenca del Río Javita

DISTRIBUCIÓN LLUVIAS (mm)											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
100	110	200	200	10	15	5	5	5	5	10	10

Tabla 13: distribución mensual de lluvias en la Cuenca del Río Zapotal

d) Escorrentía del Sector

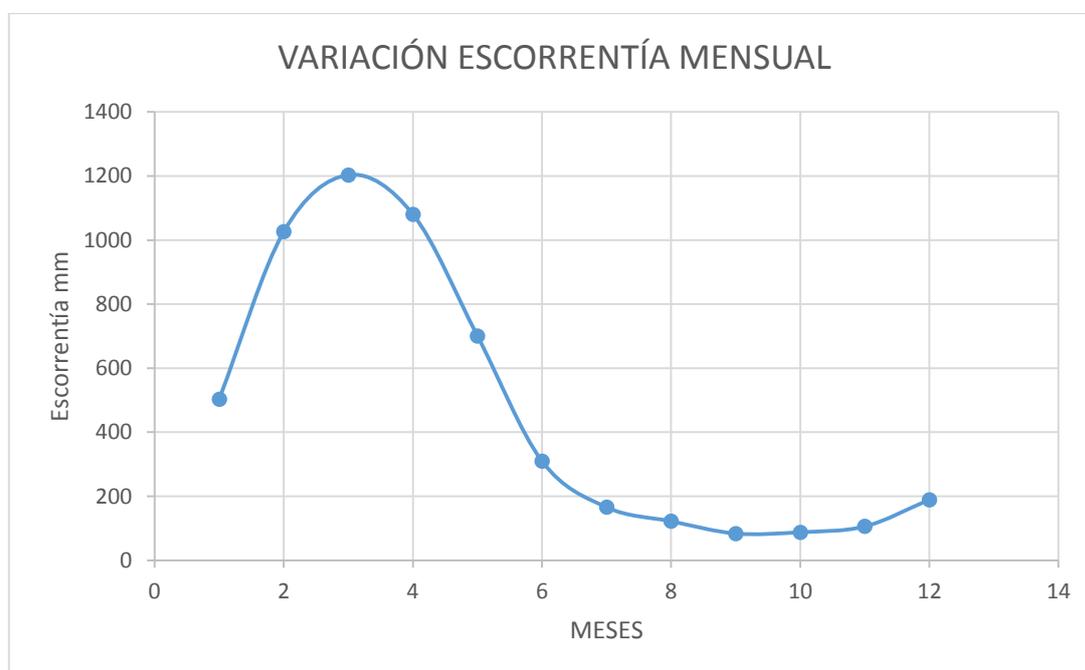
Según datos de la SENAGUA en el Plan Nacional del agua, en la unidad hidrográfica Javita, a la cual pertenece el acuífero Atahualpa, tiene una escorrentía desde la cuenca del río Javita de 50-150 mm anuales. La escorrentía se distribuye de manera inequitativa, con una lámina de escorrentía de 100-150 mm en el noreste y de 50-100 mm en el suroeste de la mencionada unidad hidrográfica (CISPDR, 2016)

VALOR	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DECIEMBRE	TOTAL
ESCORRENTÍA HM3	503.54	1026.23	1203.23	1080.83	700.93	309.76	165.68	121.87	83.61	87.64	105.81	189	5578.13
%	9%	18%	22%	19%	13%	6%	3%	2%	1%	2%	2%	3%	100%

Tabla 14: Distribución mensual de escorrentía período 1971-2010

Lo cual se representa gráficamente de la siguiente manera:

Figura 36: Variación mensual en escorrentía



Como se puede apreciar en la Figura No. 36 la mayoría de la escorrentía total del sector se presenta entre los meses de enero a mayo. Siendo la escorrentía el resto del año mucho menor. Esta escorrentía aplica tanto para la Cuenca del Río Zapotal como para la cuenca del Río Javita debido a que existe una sola estación meteorológica cercana a las dos cuencas.

Así, también se procedió a calcular el coeficiente de escorrentía para el sector. En este se toma en cuenta que la cuenca en la que se encuentra en acuífero es la cuenca del río Javita que cuenta con una extensión de 2092 km^2 .

Para el cálculo del coeficiente de escorrentía se utilizará el método de Nadal en donde se toma en cuenta la siguiente ecuación (Ibañez, Moreno, & Gisbert, sf).

Ecuación 4: Coeficiente de Escorrentía según Nadal

$$C_{\text{escorrentía}} = 0.25 * K_1 * K_2 * K_3$$

En donde:

- K_1 es el factor de extensión de la cuenca
- K_2 es el factor de lluvia media anual
- K_3 es el factor de la pendiente y la permeabilidad del suelo

Figura 37: Coeficientes método de Nadal

Extensión		Lluvia media anual		Características de la Cuenca	K_3
Km^2	K_1	mm	K_2		
10	2.60	200	0.25	Llana y permeable Ondulada Montañosa e impermeable	0.5 – 0.7 0.5 – 1.2 1.2 – 1.5
20	2.45	300	0.50		
40	2.15	400	0.75		
100	1.80	500	1.00		
200	1.70	600	1.10		
500	1.40	700	1.17		
1.000	1.30	800	1.25		
5.000	1.00	900	1.32		
10.000	0.90	1.000	1.40		
20.000	0.87	1.200	1.50		

Fuente: (Ibañez, Moreno, & Gisbert, sf)

De la siguiente Tabla se obtuvo que:

Factores método de Nadal	
K_1	1.3
K_2	0.75
K_3	0.6

Tabla 15: Factores método de Nadal

Con lo cual se procedió a calcular el coeficiente de escorrentía C:

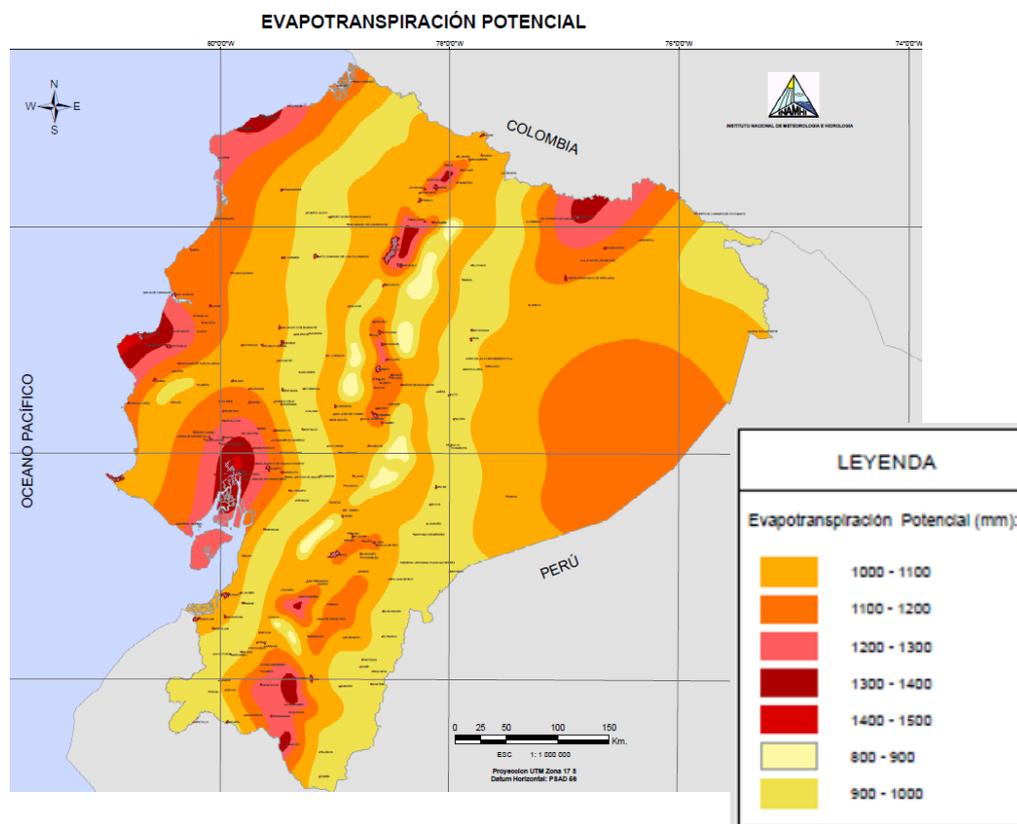
Coeficiente de Escorrentía	
C	0.146

Tabla 16: Coeficiente de escorrentía

e) Evo transpiración potencial y real del sector

La evo-transpiración potencial es la pérdida de agua en el suelo posible debido a la evaporación. En el sector, este es un importante valor que tomar en cuenta debido a que reduce la infiltración hacia el acuífero. Según datos del INAHMI la evotranspiración potencial para la zona está entre los 100-110 mm anuales.

Figura 38: Mapa evotranspiración potencial en Ecuador



Fuente: (INAHMI, 2011)

Además, se obtiene la siguiente distribución de evo transpiración mensual según el INAHMI, los datos a tomarse en caso de la cuenca de Río Javita son los de Ancón, en el caso de la cuenca del Río Zapotal serán los del sector de El Azúcar:

Figura 39: Distribución mensual de la evotranspiración

NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
SALINAS	120,73	119,46	134,45	120,06	105,39	89,19	78,53	71,87	71,3	81,11	85,74	104,18	1182
ANCON	122,41	122,38	135,42	120,4	111,36	87,12	79,96	72,66	70,97	81,87	86,15	106,91	1197,61
EL AZUCAR	130,25	129,26	135,82	129,39	114,42	91,04	83,01	83,19	83,12	88,41	92,4	111,15	1271,45

Fuente: (INAHMI, 2011)

De esto se procede a calcular el nivel de evotranspiración real usando un modelo que permita obtener este dato analíticamente a partir de la evotranspiración potencial que es un dato conocido (Budyco, 1974).

El método de Budyco propone la siguiente ecuación:

Ecuación 5: Evotranspiración Real según Budyco

$$ETR = \sqrt{\left[ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right) \right]}$$

De la cual obtenemos que los valores de evotranspiración real son los siguientes:

EVOTRANSPIRACIÓN REAL (mm)											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
85.79	93.61	95.46	75.75	24.65	9.98	19.61	14.84	9.96	14.89	19.69	37.73

Tabla 17: Evotranspiración real mensual para la cuenca del Río Javita

EVOTRANSPIRACIÓN REAL (mm)											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
78.25	82.44	109.78	106.09	9.99	14.92	5.00	5.00	5.00	5.00	9.98	9.99

Tabla 18: Evotranspiración Real para la cuenca del Río Zapotal

f) Coeficiente de Infiltración

La tasa de Infiltración es una cuantificación de la capacidad potencial del suelo absorber agua a través de su superficie. Sin embargo, la cantidad real de infiltración del suelo también depende de la cantidad de precipitación en la zona. La tasa real de infiltración sólo coincide con la potencial cuando la precipitación excede o es igual al potencial de infiltración (Heras, 1970).

Para calcular la tasa de infiltración se deben obtener diferentes parámetros como:

- La capacidad de infiltración del suelo. Para obtener esta se utilizó el método de Kiastakov en el cual se utiliza la siguiente ecuación:

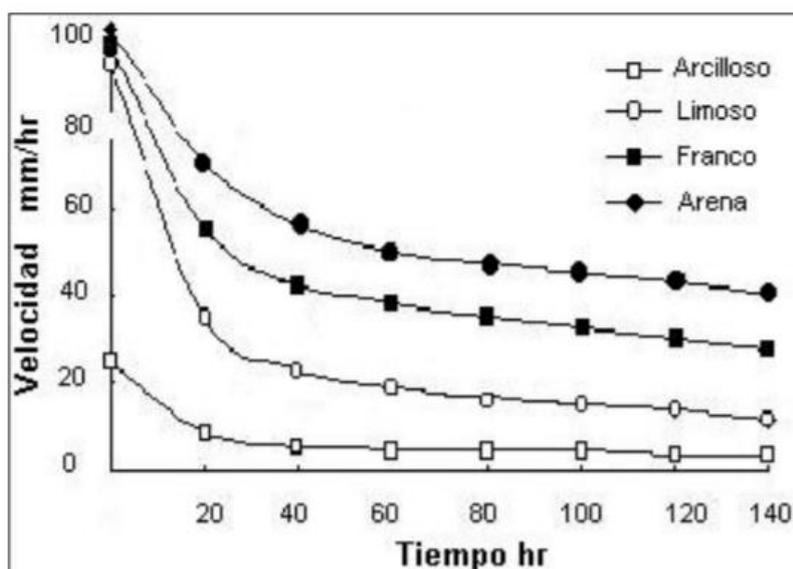
Ecuación 6: Método Kiastakov para la velocidad de infiltración

$$I = K \times T_n$$

En donde:

- I es la velocidad de infiltración
- T es el tiempo en minutos
- K es la constante de infiltración
- n es la pendiente de la curva de velocidad de infiltración con respecto al tiempo

Figura 40: Curva de Velocidad de Infiltración



Fuente: (Pizarro, sf)

El tipo de suelo en el sector se caracteriza por ser en su mayoría arena en la superficie lo cual hace que sea más apto para la infiltración.

El coeficiente de infiltración del suelo se obtendrá por medio del método propuesto por "Manual de Instrucciones de Estudios Hidrológicos" realizado por las Naciones Unidas, el mismo propone la siguiente ecuación:

Ecuación 7: Coeficiente de Infiltración del Suelo

$$C = K_P + K_V + K_{FC}$$

En donde:

- C es el coeficiente de infiltración
- K_P es la Fracción de infiltración debido a la pendiente del terreno
- K_V es la Fracción de infiltración debido a la cobertura vegetal
- K_{FC} es la Fracción de infiltración debido a la textura del suelo.

En este caso para analizar la fracción de infiltración debido a la pendiente del terreno se toma en cuenta que el coeficiente de infiltración aparente varía a una razón de 0.04 al pasar de pendientes superiores al 7%. Al estar el acuífero ubicado en una zona plana con pendientes inferiores al 1% se tomará un valor de K_p de 0.3, es decir del 30% tanto para la cuenca del Río Javita como para la Cuenca del Río Zapotal.

En cuanto a la cobertura vegetal Schosinsky & Losilla proponen la siguiente Tabla de valores:

Figura 41: Valores de infiltración por cobertura vegetal

Por cobertura vegetal	K_v
Cobertura con zacate menos 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate más de 75%	0,21

Fuente: (Schosinsky & Losilla, 2000)

En este caso se debe tomar en cuenta que la Unidad Hidrográfica Javita, en donde se encuentra el acuífero “Atahualpa” tiene cuenta con 17.42 km^2 de tierra con cultivos y el resto de la cuenca se caracteriza por una cobertura vegetal pobre y con matorrales debido a que la zona es semi desértica. Por esta razón se toma un coeficiente K_v con un valor de 0.09.

En el caso de la cuenca del Río Zapotal la vegetación se caracteriza por matorrales bajos. Además, la cuenca del Río Zapotal cuenta con aproximadamente un 2% de su área con cultivos. Esto al suponer menos del 10% del área de la cuenca hidrográfica se considera despreciable en términos del cálculo de K_v por lo tanto en esta cuenca también se toma un coeficiente K_v con un valor de 0.09.

En el caso del coeficiente K_{FC} este se da de acuerdo con el tipo de suelo del sector.

En el área el suelo se caracteriza por ser predominantemente arena.

Schosinsky propone la siguiente ecuación para obtener K_{FC} :

Ecuación 8: Coeficiente Infiltración por Textura del Suelo

$$K_{fc} = 0.267 \ln(fc) - 0.000154 (fc) - 0.723$$

En donde:

- K_{FC} es el coeficiente de infiltración por textura del suelo
- fc es la infiltración básica del suelo mm/día

Por lo tanto, para la cuenca del Río Javita:

Se calculó fc en función de la curva mostrada en la Figura No.40, para esta cuenca se tomó en cuenta un fc de 58 mm/día, esto debido a que el suelo en el sector son areniscas y arenas.

De esto se obtuvo:

Coeficiente por textura del terreno	
K_{fc}	0.35
fc	58

Tabla 19: Coeficiente por textura del terreno cuenca del Río Javita

Para la cuenca del Río Zapotal:

Se calculó fc en función de la curva mostrada en la Figura No. 40, para esta cuenca se tomó en cuenta un fc de 45 mm/día, esto debido a que el suelo en el sector es una arena con influencia de limos y lutitas.

De esto se obtuvo:

Coeficiente por textura del terreno	
K _{fc}	0.29
f _c	45

Tabla 20: Coeficiente por textura del terreno cuenca del Río Zapotal

De esto se procede a calcular el valor del coeficiente de infiltración de la cuenca del río Javita.

Coeficiente Infiltración	
K_{FC}	0.35
K_v	0.09
K_p	0.3
C	0.74

Tabla 21: Coeficiente de Infiltración cuenca del Río Javita

El coeficiente de infiltración es 0.74 para la cuenca del Río Javita de acuerdo con este método de cálculo.

También se procede a calcular el valor del coeficiente de infiltración de la cuenca del río Zapotal.

Coeficiente Infiltración	
K_{FC}	0.29
K_v	0.09
K_p	0.3
C	0.68

Tabla 22: Coeficiente de Infiltración cuenca del Río Zapotal

g) Infiltración pluvial mensual

La infiltración pluvial mensual está dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 9: Infiltración Pluvial Mensual

$$I_m = C_{infiltración} * P_{mensual}$$

Lo cual basado en la distribución de las precipitaciones en el año de la zona resulta en una infiltración pluvial mensual de:

INFILTRACIÓN MENSUAL mm											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
74	118.4	103.6	74	18.5	7.4	14.8	11.1	7.4	11.1	14.8	29.6

Tabla 23: Infiltración pluvial mensual cuenca del Río Javita

INFILTRACIÓN MENSUAL mm											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
68	74.8	136	136	6.8	10.2	3.4	3.4	3.4	3.4	6.8	6.8

Tabla 24: Infiltración Pluvial Mensual cuenca del Río Zapotal

Balance Hídrico de la Cuencas del Río Javita y del Río Zapotal

El balance hídrico de una cuenca de agua nos permite evaluar los recursos hídricos disponibles del sector.

Este está definido por la siguiente ecuación:

Ecuación 10: Ecuación de Balance Hídrico

$$P = ETR + ESD + I$$

En donde:

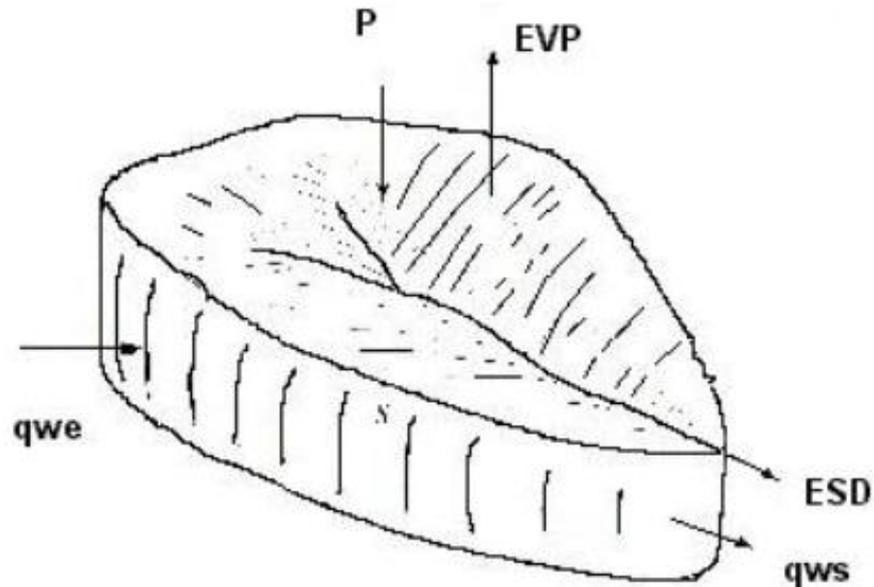
- P es la precipitación del sector
- ETR es la evotranspiración real del sector
- ESD es la esorrentía
- I es la infiltración

El balance hídrico de una cuenca se sostiene en base a un equilibrio hidrogeológico, el mismo puede expresarse mediante:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} \mp \text{Almacenamiento}$$

Sin embargo, puede considerarse que para tiempos relativamente grandes el almacenamiento se vuelve despreciable y por lo tanto este equilibrio se simplifica, y las entradas se igualan a las salidas (Vélez, 1999).

Figura 41: Balance Hídrico de una cuenca



Fuente: (Vélez, 1999)

Entonces de esto se obtiene que:

$$\text{Entradas} = P - ETR$$

$$\text{Salidas} = ESC + I$$

Para analizar si existe un déficit o superávit en la cuenta se debe analizar el siguiente enunciado:

$$P > ETP$$

En donde:

- ETP es la evotranspiración potencial

Para la Cuenca del Río Javita:

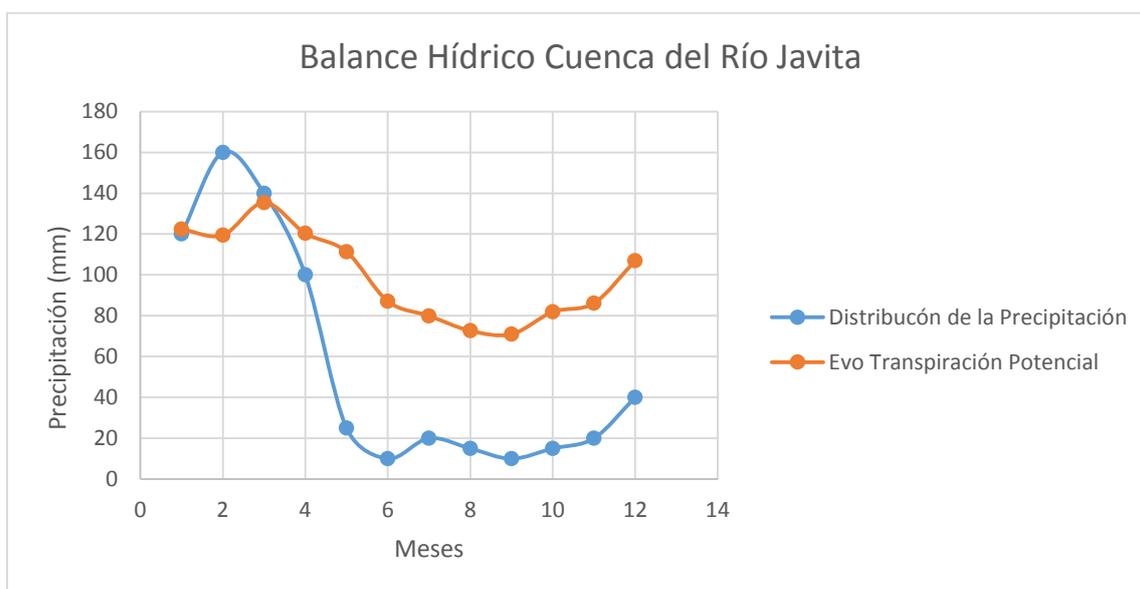
En base a las precipitaciones planteadas en la Tabla No. 13, la escorrentía descrita en la Tabla No. 15, la infiltración calculada según la Tabla No. 23 y la evotranspiración real presentada en la Tabla No. 18 se obtuvo que para la cuenca del Río Javita el resultado del balance hídrico es el siguiente:

BALANCE HÍDRICO mm											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
-2.41	40.54	4.58	-20.40	-86.36	-77.12	-59.96	-57.66	-60.97	-66.87	-66.15	-66.90

Tabla 25: Balance Hídrico Río Javita

Además, se obtuvo el siguiente gráfico que explica la interacción entre la precipitación y el evo transpiración potencial del lugar:

Figura 42: Balance Hídrico Cuenca Río Javita



Como se puede apreciar en la Figura No. 43 existe un déficit hídrico en la cuenca del río Javita la mayor parte del año. Este déficit dificulta el acceso al agua potable o de riego a las poblaciones rurales del sector.

Asimismo, para la cuenca del Río Zapotal:

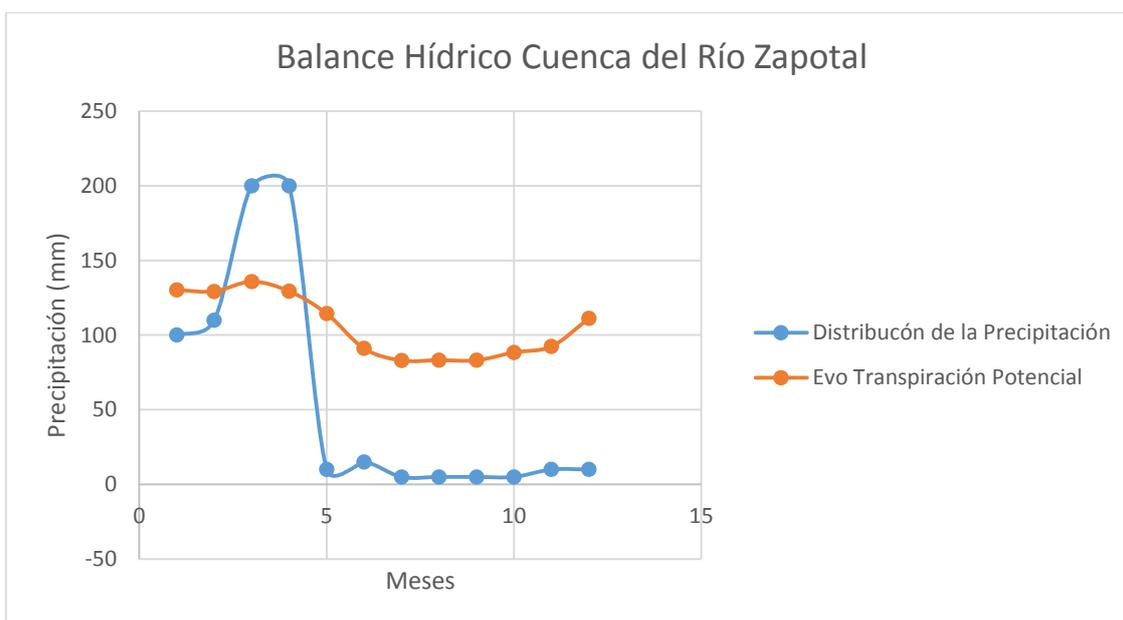
En base a las precipitaciones planteadas en la Tabla No. 14, la escorrentía descrita en la Tabla No. 15, la infiltración calculada según la Tabla No. 24 y la evotranspiración real presentada en la Tabla No. 19 se obtuvo que para la cuenca del Río Javita el resultado del balance hídrico es el siguiente:

BALANCE HÍDRICO mm											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
-30.25	-19.26	64.18	70.61	-104.42	-76.04	-78.01	-78.19	-78.12	-83.41	-82.4	-101.15

Tabla 26: Balance Hídrico Cuenca del Río Zapotal

También se obtuvo el siguiente gráfico que explica la interacción entre la precipitación y el evo transpiración potencial del lugar:

Figura 43: Balance Hídrico cuenca del Río Zapotal



Como se puede apreciar en la Figura No. 44 también existe un gran déficit hídrico en esta cuenca. Este déficit resulta aún más intenso en los meses finales del año.

Recarga del Acuífero Atahualpa

La recarga del acuífero está dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 11: Ecuación Recarga de Acuífero

$$R_{pm} = I_m + H_{im} - H_{fm} - ETR$$

En donde:

- R_{pm} es la recarga mensual del acuífero en mm
- I_m es la infiltración mensual del suelo mm
- H_{im} es la humedad inicial del mes mm
- H_{fm} es la humedad final del mes mm
- ETR es la evotranspiración mensual

a) Humedad del suelo al final del mes

La humedad del suelo al final del mes se calculará a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 12: Ecuación del Suelo al Final del Mes

$$H_{fm} = C_{fm} * H_{im}$$

En donde:

- H_{fm} es la humedad al final del mes
- C_{fm} es el coeficiente de humedad al final del mes
- H_{im} es la humedad inicial del mes

Para calcular C_{fm} se han de tomar en cuenta parámetros del suelo y características de la precipitación de la zona. Se toma en cuenta la siguiente ecuación:

Ecuación 13: Coeficiente de Humedad del Suelo

$$C_{fm} = \frac{H_{im} - PM + I_m}{CC - PM}$$

En donde:

- C_{fm} es el coeficiente de humedad al final del mes
- H_{im} es la humedad inicial del mes mm
- PM es el punto de marchitez del suelo mm
- CC es la capacidad de campo del suelo mm
- Im es la infiltración mensual del suelo mm

Como parámetro de humedad inicial del suelo se ha de tomar un valor típico para suelos arenosos como lo es el 30% de humedad y un peso seco típico de 1.48 gr/cm³ en el caso de la cuenca del Río Javita. En el caso de la cuenca del Río Zapotal se tomarán los valores típicos para una arcilla dura es decir una humedad del 25% y un peso típico de 1.63 gr/cm³ (Coduto, 1999).

Figura 44: Valores típicos de humedad por tipo de suelo

Tipo de suelo	e	w % Típico
Arena uniforme suelta	0.8	30
Arena uniforme densa	0.45	16
Arena limosa suelta	0.65	25
Arena limosa densa	0.4	15
Arcilla dura	0.6	21
Arcilla blanda	0.9 - 1.4	30 - 50
Arcilla orgánica suave	2.5 - 3.2	90 - 120

Fuente: (Coduto, 1999)

Para los parámetros de punto de marchitez y capacidad de campo de los suelos Grassi propone la siguiente Tabla de valores:

TEXTURA DEL SUELO	Porcentaje por peso del suelo seco	
	PMP %	CC %
Arenoso	2 a 6	6 a 12
Franco-arenoso	4 a 8	10 a 18
Franco	8 a 12	18 a 26
Arcillo-arenoso	13-17	27 a 31
Arcilloso	15-19	31 a 39

Tabla 27: Capacidad de Campo y Punto de Marchitez de un Suelo

En el caso de la cuenca del Río Javita, el suelo es arenoso, por lo tanto, se toma un valor de punto de marchitez del 5% y un valor de capacidad de campo del 10%. En el Caso de la cuenca del Río Zapotal se tomará valores del 8% para el punto de marchitez y del 18% para el caso de la capacidad de campo debido a que el suelo es una arenisca con influencia de limos.

Estos valores deben ser consistentes en unidades para lograr ingresar a la ecuación por esta razón los valores deben estar en milímetros. Para lograrlo, se debe tomar en cuenta a la vegetación característica del lugar que absorbe agua de la infiltración, en este caso son matorrales y plantas bajas cuya profundidad de raíces es de aproximadamente 400 mm.

Al calcular el coeficiente de humedad al final del mes se obtiene que:

PM %	7%
CC %	15%
H_{im} %	30%

Tabla 28: Datos Iniciales para cálculo de coeficiente humedad final cuenca del Río Javita

PM %	13%
CC %	29%
H_{im} %	25%

Tabla 29: Datos Iniciales para cálculo de coeficiente humedad final cuenca del Río Zapotal

A estos datos se debió transformarlos a mm tomando en cuenta la profundidad de las raíces. De lo cual se obtuvo:

PM (mm)	29.60
CC (mm)	59.20
H_{im} (mm)	120.00

Tabla 30: Datos iniciales en mm para cuenca del Río Javita

PM (mm)	52.16
CC (mm)	117.36
H_{im} (mm)	100.00

Tabla 31: Datos iniciales en mm para cuenca Río Zapotal

Y al calcular los coeficientes se obtuvo:

COEFICIENTE DE HUMEDAD FINAL											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
5.5541	7.0541	6.5541	5.5541	3.6791	3.3041	3.5541	3.4291	3.3041	3.4291	3.5541	4.0541

Tabla 32: Coeficiente Humedad Final para cuenca del Río Javita

Al ser todos estos valores mayores que 1 se toma que el coeficiente de humedad final es 1 por lo cual la humedad inicial y final serían las mismas.

COEFICIENTE DE HUMEDAD FINAL											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1.7767	1.8810	2.8196	2.8196	0.8380	0.8902	0.7859	0.7859	0.7859	0.7859	0.8380	0.8380

Tabla 33: Coeficiente Humedad final cuenca del Río Zapotal

Para todos los valores mayores que 1 se toma que el coeficiente de humedad final es 1 por lo cual la humedad inicial y final serían las mismas.

b) Recarga del acuífero

Se conocen todos los valores en la ecuación presentada anteriormente. Se asume que la evotranspiración del sector es como se la que se calculó por el método de Budyco en la Tabla No.17 para el sector de Ancón y el Azúcar.

De esto se obtiene:

RECARGA MENSUAL DEL ACUÍFERO (mm)											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
3.01	24.79	8.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 34: Recarga mensual del acuífero cuenca del Río Javita

La tabla anterior muestra el déficit existente en el sector en cuanto a recurso hídrico.

En el caso de la cuenca del Río Javita se tomaron los valores de evotranspiración real descritos en la Tabla No.18, de esto se concluyó que el acuífero sólo logra recargarse por medio de la infiltración de enero a marzo a una tasa máxima de 24.79 mm en el mes de febrero.

RECARGA MENSUAL DEL ACUÍFERO (mm)											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
0.00	0.00	26.22	29.91	13.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 35: Recarga del acuífero cuenca del Río Zapotal

La Tabla anterior muestra el aporte de la cuenca del Río Zapotal al acuífero en mm, este aporte se realiza en los meses de marzo a mayo.

A continuación, se realiza el cálculo del agua total que ingresa en el acuífero en base a la siguiente ecuación:

Ecuación 14: Recurso Disponible

$$\text{Recurso disponible (hm}^3\text{)} = \frac{\text{Recarga (mm)}}{1000000} * \text{Area (km}^2\text{)} * 1000$$

En donde:

- Recarga representa la recarga mensual del acuífero
- El área representa el área de la cuenca hidrográfica.

En la siguiente Tabla se muestra el recurso hídrico disponible tanto mensual como anualmente debido a las dos cuencas:

CUENCA	AREA	RECARGA HM3												
		ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	SUBTOTAL
JAVITA	813.0	2.4	20.2	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.2
ZAPOTAL	349.0	0.0	0.0	9.2	10.4	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.1
													TOTAL	53.3

Tabla 36: Recurso Hídrico Disponible

Influencia de intercambio de aguas superficiales

Los cuerpos de agua superficial suelen influir en la hidrología y geología de las aguas subterráneas.

Así la interacción puede tomar tres formas, entre estas:

- Las corrientes ganan caudal desde el acuífero
- Las corrientes pierden caudal hacia el acuífero
- Las corrientes pueden perder o ganar caudal en ciertos tramos.

Para que la corriente pierda caudal hacia el acuífero, el nivel de agua del acuífero debe ser menor. Por el contrario, para que la corriente gane agua desde el acuífero el nivel de agua de este debe ser mayor al de la corriente. Si la corriente pierde agua esta puede estar conectada al sistema de agua subterránea por medio de una zona saturada o puede estar desconectado de esta por una zona no saturada, en este caso el bombeo de agua subterránea cerca del cauce no afecta el flujo del río (Estrada, 2009).

El intercambio entre aguas superficiales y aguas subterráneas está controlado por las siguientes características del entorno:

- Magnitud y distribución de las conductividades hidráulicas
- Relación entre los niveles de agua del río y del acuífero
- Geometría y posición del canal del río en la cuenca hidrográfica.

Para modelar las interacciones entre estos se utilizó la ley de Darcy, esta se muestra en la siguiente ecuación:

Ecuación 15: Ley de Darcy Intercambio Aguas Superficiales

$$q = C_r(h_r - h_a) \frac{m^3}{hr}$$

En donde:

- q es el flujo entre el río y el acuífero
- h_r es el nivel del río
- h_a es el nivel del acuífero
- C_r es la conductancia hidráulica de la conexión entre el río y el acuífero.

Para encontrar la conductancia hidráulica de esta zona se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 16: Conductancia hidráulica

$$C_r = \frac{K_r L_r W}{M}$$

En donde:

- K_r es la conductividad hidráulica del lecho del río
- L es la longitud de la corriente
- W es el ancho del canal
- M es el espesor del material existente entre el acuífero y el río.

Para simplificar los cálculos se utilizará el método de

En la cuenca del Río Javita existen aguas superficiales que podrían contribuir a la recarga del acuífero “Atahualpa”. Entre estos se encuentran:

- Represa Velasco Ibarra: Fue construida en los años 50 y es de carácter estacional. Su caudal se controla de manera artificial, suele llenarse en invierno. Sus aguas presentan una salinidad más alta de lo normal. Se encuentra a 6 msnm. No ejerce ninguna influencia en la recarga del acuífero “Atahualpa”.

- Río Salado: Es un arroyo intermitente que suele secarse durante la temporada seca. No existen datos de caudales disponibles.
- Río Hondo: Es un arroyo intermitente que suele secarse durante la temporada seca. No existen datos de caudales disponibles.
- Río Las Balsas: Es un río intermitente que se seca durante la temporada de Julio a Diciembre.

Como se ha expuesto antes los ríos en esta región son temporales, es decir, solamente existen durante algunos meses y se secan durante otros. Estos ríos cuentan con un ancho de aproximadamente hasta 3 m (Vidal-Abarca, 2004). Por esta razón la probabilidad de existencia de una zona saturada que pueda hacer que el acuífero pierda caudal en beneficio de estos ríos es muy baja. Por esta razón se considera que este intercambio de aguas que resultaría negativo para la recarga del acuífero no existe.

Aun así, se puede considerar la existencia de una corriente que infiltre agua del río en beneficio del acuífero. Para comprobar esto, se debe considerar los factores establecidos en la ecuación anterior.

La conductividad hidráulica depende del tipo de suelo que exista en el lecho del río. En los casos de los ríos Hondo y Salado y Las Balsas los lechos de estos presentan un suelo conformado por arenas, areniscas y conglomerados. Por lo tanto, la conductividad hidráulica de estos estaría en aproximadamente 0.01 cm/s (Coduto, 1999).

Las longitudes axiales de estos ríos se encontraron al clasificarlos en microcuencas. El Río Salado tiene una longitud axial de 47.91 km, el Río Hondo tiene una longitud axial de 21.59 km y finalmente el Río Las Balsas tiene una longitud de 47.9 km. Estas longitudes axiales se tomarán como la longitud de corriente (Rodríguez, 2014)

Se tomó un espesor de material entre el lecho del río y el acuífero de 11.5 m debido a que esta es la profundidad media a la cual se encuentra el acuífero.

De esto se obtuvo:

$$C_{r1} = 449.937 \frac{m^2}{hr}$$

$$C_{r2} = 202.29 \frac{m^2}{hr}$$

$$C_{r1} = 449.9 \frac{m^2}{hr}$$

Se puede observar como el Río Grande y el Río Salado ejercen una influencia mayor con respecto a la corriente del Río Hondo. Para calcular el nivel del río se tomó en cuenta que las cuencas principales de estos ríos se encuentran en una zona denominada meseta costera. La máxima altitud en estas zonas es de 420 msnm y la mínima altitud está alrededor de 40 msnm por esta razón y debido a la falta de datos se calcula una media de nivel de río a partir de estos datos. Así el nivel de río queda establecido en 190 msnm (Rodríguez, 2014)

El nivel del acuífero se mantiene en 11.5 m por ser la profundidad media a la cual se encuentra la reserva hídrica analizada.

De esto resulta:

$$q_{r1} = 80313.75 \frac{m^3}{hr}$$

$$q_{r2} = 36108.77 \frac{m^3}{hr}$$

$$q_{r3} = 80307.15 \frac{m^3}{hr}$$

De esto se toman las áreas que comprenden las microcuencas de estos ríos para calcular el volumen de agua que se infiltra anualmente. Las áreas son las siguientes:

- Río Salado: 74.1 km^2
- Río Hondo: 164.22 km^2
- Río Las Balsas: 574.69 km^2

Así se calcula el volumen de agua que ingresaría al acuífero anualmente, se tomó en cuenta que estos ríos son intermitentes y que se secan durante 8 meses al año aproximadamente.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

INTERCAMBIO AGUAS SUPERFICIALES				
Río	Longitud km	Área km ²	q m ³ /hr	Volumen Agua Infiltrado km ³
Río Salado	47.91	74.1	80313.75	0.70354845
Río Hondo	21.59	164.22	36108.77	0.316312825
Río Las Balsas	47.91	574.69	80307.15	0.703490634

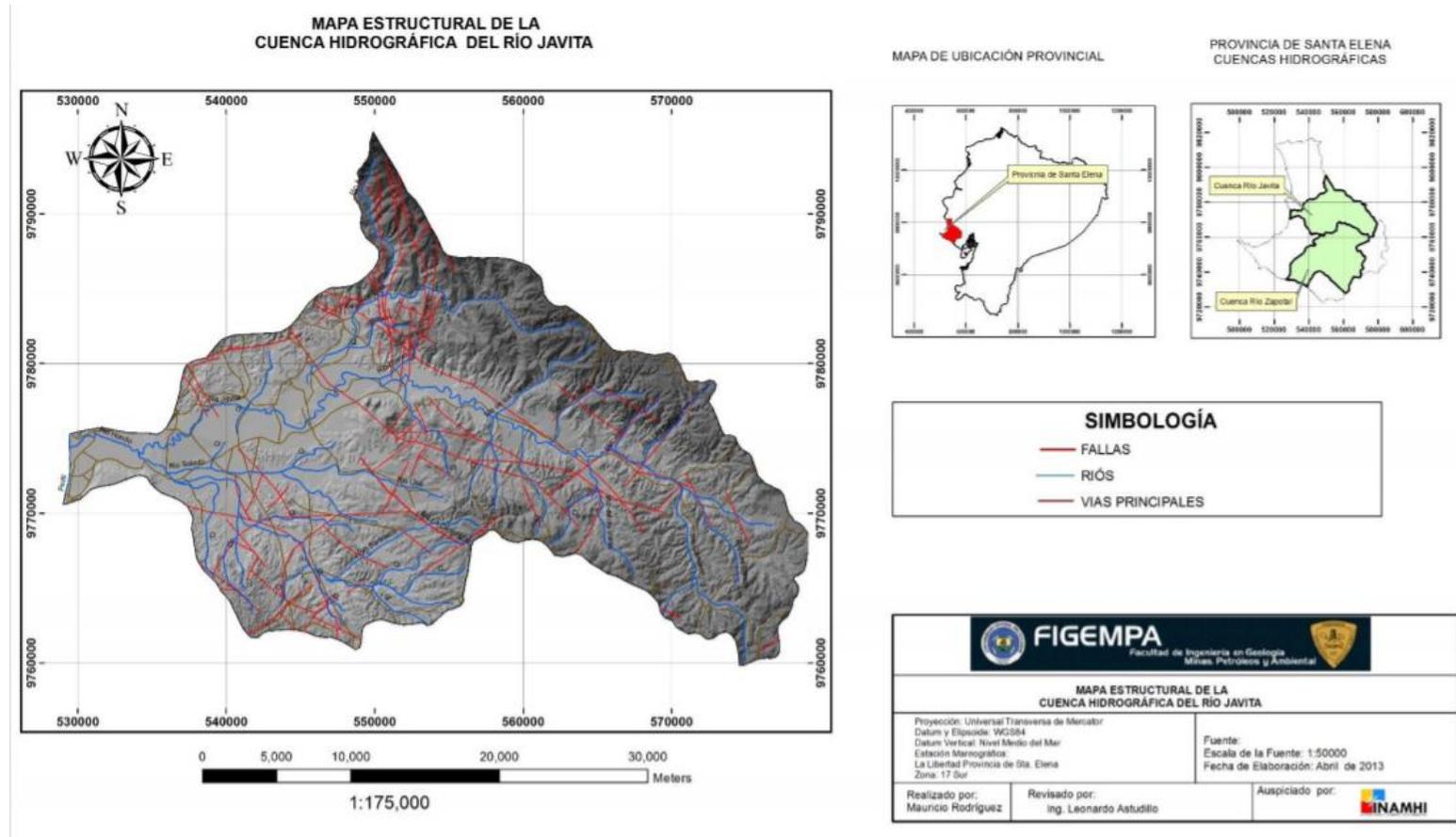
Tabla 37: Volumen de Agua Filtrado por Río

Volumen Infiltrado km³	1.72
Volumen Infiltrado Neto km³	0.58

Tabla 38: Volumen Filtrado Neto debido a Aguas Superficiales

Así se calculó que aproximadamente 0.58 km^3 de agua se infiltran de ríos aledaños aportándole al acuífero menos del 0.1 % de lo que aporta la infiltración de lluvias al mismo. Al encontrarse que el aporte de los ríos al acuífero es mínimo, se desprecia el mismo al calcular el recurso hídrico disponible para el consumo

Figura 45: Mapa Estructural de la Cuenca del Río Javita



Fuente: (Rodríguez, 2014)

Sostenibilidad de la Demanda

Se realizó una comparación de la demanda total de agua de estas poblaciones y la oferta hídrica del acuífero debido a la recarga de este. De esto se obtuvieron las siguientes

Tablas:

AÑO	ÁREA CULTIVOS ha	DEMANDA TOTAL m³/ha	DEMANDA HM³/año
2010	1150.0	11250.0	12.9
2013	1917.1	11250.0	21.6
2016	2663.5	11250.0	30.0
2019	3409.8	11250.0	38.4
2022	4156.2	11250.0	46.8
2025	4902.5	10875.0	53.3
2028	5648.8	10875.0	61.4
2031	6395.2	10875.0	69.5
2034	7141.5	10875.0	77.7
2035	7390.3	10500.0	77.6
2037	7887.9	10500.0	82.8
2040	8634.2	10500.0	90.7

Tabla 39: Demanda hídrica para uso de cultivos

AÑO	POBLACIÓN RURAL hab	DEMANDA TOTAL l/día/hab	DEMANDA HM³/año
2010	90902	181	6.0
2013	99646	182	6.6
2016	109231	184	7.3
2019	119738	186	8.1
2022	131256	187	9.0
2025	143882	189	9.9
2028	157722	189	10.9
2031	172894	190	12.0
2034	189525	195	13.5
2037	207756	200	15.2
2040	227740	200	16.6

Tabla 40: Demanda hídrica para uso doméstico

AÑO	TOTAL, DE DEMANDA HM³/año
2010	18.9
2013	28.2
2016	37.3
2019	46.5
2022	55.7
2025	63.2
2028	72.3
2031	81.5
2034	91.2
2037	98.0
2040	107.3

Tabla 41: Demanda Hídrica Total

Como se puede observar en las Tablas anteriores la demanda total en hectómetros cúbicos es menor que la oferta de este acuífero hasta aproximadamente el año 2020 de acuerdo con la oferta hídrica presentada en la Tabla No. 37. Si la tendencia a incrementar las áreas de cultivo se cumple, es imperativo buscar otras fuentes de agua que puedan abastecer el agua de riego que necesita el sector.

De acuerdo con esto, si el acuífero “Atahualpa” es la única fuente de agua en el sector, se está incurriendo en sobre explotación y hay que investigar el daño debido a esto, especialmente en forma de intrusión salina.

Manual de Procedimiento para la Autorización de Permisos para la Construcción de Pozos para el aprovechamiento de aguas subterráneas

a) Análisis Legislación Vigente

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua vigente en Ecuador establece en su Artículo No. 117 que para explotar el recurso hídrico subterráneo por medio de pozos es necesario obtener una licencia para que la autoridad pertinente verifique que la explotación del recurso se da en condiciones satisfactorias. Además, la misma ley en su Artículo No. 120 establece que la Autoridad Única del Agua deberá inspeccionar las explotaciones del recurso para verificar el cumplimiento de lineamientos y condiciones de explotación que consten en la licencia.

Así, la actual Ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua supone los siguientes requisitos para la concesión de una licencia de explotación de aguas subterráneas:

- a) Explicación del objeto a que hayan de ser dedicadas las aguas que se descubran, zonas a que alcancen las labores, situación, características y duración prevista de las obras y sistema y puntos de evacuación de residuos y caudales (LORHUyA,2015).
- b) Plano general del terreno o zona de afloramiento, en el que se señalen los aprovechamientos existentes, las corrientes de agua naturales y artificiales, los manantiales y los pozos, los caminos y explotaciones mineras que existan (LORHUyA,2015).
- c) Plano de las obras previstas, con sus detalles, diámetros y profundidades
- d) Presupuesto aproximado de las obras (LORHUyA,2015).
- e) Usos y finalidades del aprovechamiento (LORHUyA,2015).

- f) Régimen de explotación con indicación del caudal máximo y volumen anual que se pretende utilizar (LORHUyA,2015).

A pesar de la existencia de este procedimiento para otorgar una licencia de explotación, no existe una normativa vigente que controle la construcción de pozos de aprovechamiento de aguas subterráneas. Por lo tanto, es necesaria su creación para tener control sobre los parámetros de construcción de estos y asegurar una explotación del recurso de una forma sostenible y que brinde un recurso de calidad a la población.

b) Riesgos debido a explotación indebida del recurso hídrico subterráneo

La explotación del recurso subterráneo sin control puede conllevar consecuencias ambientales, económica y en la calidad de vida de las poblaciones que utilizan el recurso. Así, un pozo construido sin los parámetros necesarios puede resultar menos eficiente debido a la entrada de arena en el pozo y al aumento de pérdidas de agua. Además, un mal sistema de explotación del recurso puede exacerbar problemas de contaminación en los pozos (Sauquillo A. , 1994).

Así mismo, cuando los pozos llegan al final de su vida útil es imperativo que estos se dispongan adecuadamente debido a que los pozos abandonados pueden generar problemas de contaminación en el acuífero. Esto debido a que son focos en los cuales los agentes contaminantes pueden viajar verticalmente hacia las aguas y después propagarse a través de ellas (García & Madurga, 1998)

La normativa de construcción de pozos debe tener en cuenta no sólo la construcción adecuada del pozo y sus componentes para evitar la contaminación, además de tener la eficiencia necesaria como para evitar pérdidas, sino que debe tener en cuenta la correcta disposición de los pozos al final de su vida útil con el fin de preservar la calidad del agua en el acuífero.

Algunos de los problemas más comunes en la construcción de pozos son la falta de cementación, la incorrecta instalación de filtros, la falta de válvulas para evitar el retroceso del pozo entre otras.

Es importante recordar que la contaminación en aguas subterráneas se da a una velocidad menor a la contaminación de aguas superficiales. Sin embargo, también los problemas de contaminación son muy difíciles de solucionar y a menudo irreversibles.

c) Lineamientos para la construcción de pozos de agua subterránea operados manualmente

Existen varios tipos de pozo, sin embargo, los pozos de los cuáles se explota el recurso hídrico en esta región son de carácter poco profundo y la mayoría de las veces somero. Además, se debe tomar en cuenta que la mayoría de las veces los pozos que se construyen son poco tecnificados y artesanales. De ahí, la importancia de una guía de construcción de pozos, para mejorar el sistema de explotación del recurso y disminuir riesgos. La perforación de pozos debe realizarse de una manera económica, fácil y rápida (Sauquillo A. , 1994)

Para esto se necesitan las siguientes fases:

- **Etapa previa a la perforación:** En esta etapa se han de presentar todos los estudios previos a la perforación y se debe obtener la concesión para realizar el pozo conforme a la Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua.

Además, antes de la construcción se deben tener en cuenta aspectos como:

- Se debe seleccionar cuidadosamente el punto en donde se realizará el pozo. Para elegir este punto se debe tomar en cuenta que fuentes de contaminación como vertederos de basura, fuentes de desechos sólidos se deben evitar (Pissa, 2015).
Además, se debe conocer otros puntos cercanos de explotación del recurso, para impedir la interacción entre pozos.
- Se deben realizar estudios geológicos e hidrogeológicos en el sector con el fin de identificar fallas, tipo de suelo y espesores de este (Bellido, 2004)

- Los estudios mencionados deberán realizarse en esta fase obligatoriamente, sobre todo si el pozo es profundo
- Se debe realizar un estudio hidro geoquímico en el lugar. Este estudio puede realizarse con Sondeos Eléctricos Verticales. Esto permite conocer la resistividad eléctrica de los materiales, así como la saturación y la calidad del agua, esto para dar mayor precisión al sitio de elección para la perforación (Bellido, 2004).
- Elegir el equipo de perforación necesario.
- Se puede elegir entre varios equipos de perforación y formas de perforación. Entre las más comunes están:
 - a)** Torre de tres cuerpos: Es el sostén o armazón de la estructura. Este tipo de torre es una columna en forma triangular compuesta por tres varillas unidas por ángulos. Esta torre está especificada para sitios de difícil acceso. Además, este tipo de torre funciona exitosamente en terrenos del tipo arenoso y arcilloso. Esto la hace ideal para zonas costeras.
Apto para perforaciones de hasta 100 metros en terrenos blandos (Bellido, 2004)
 - b)** Torre de dos cuerpos: Sirve como base de la estructura. Está formada por cuatro varillas unidas por ángulos. Esta torre está especificada para sitios con mayor facilidad de acceso. También funciona exitosamente en terrenos compuestos por arenas o arcillas.
Apto para perforaciones de hasta 100 metros en terrenos blandos (Bellido, 2004)

Figura 46: Sistema de Perforación tipo Torre



Fuente: (Bellido, 2004)

Además, la torre de perforación debe tener un sistema de acople compuesto por una bisagra, además de un sistema de polea y un sistema de anclaje conformado por cuñas en los extremos de las columnas de las torres.

- c) Juntamente con el sistema de torres se debe tener un sistema de broca para perforar el pozo. Este sistema de broca debe estar conformado tanto por la broca como por el tubo de hierro reforzado al que esta se ancla para darle mayor extensión (Pissa, 2015)

La broca debe tener un diámetro de acuerdo con el tubo a utilizarse en la perforación.

- d) También se debe tener una bomba de lodo para operar la perforación. Este dispositivo evita deslizamientos, derrumbes de las paredes del pozo o bloqueos del pozo al inyectar agua o lodo al momento de la perforación. Es instalada a un

lado del foso de lodo y es operada a través de una manija por presión (Bellido, 2004)

- **Etapa de perforación:** En esta etapa se ha de perforar el pozo. Para la perforación se debe contar con un técnico especializado en perforaciones. Además, el propietario del pozo debe proveer un espacio lo suficientemente amplio para que se pueda realizar la perforación con comodidad (Pissa, 2015)
 - a. Se deben instalar los equipos de perforación en la zona. Esto incluye el anclaje de las torres de perforación, los tubos de perforación y la broca. Durante la instalación de la torre de perforación se debe verificar que esta se encuentre bien nivelada. Finalmente, se debe asegurar la torre con alambres tensores (Pissa, 2015)
 - b. Se debe instalar el sistema de bombeo de lodos, para esto se debe despejar dos fosas, una manguera e instalar la bomba de lodos. Se recomienda que exista un técnico encargado para este requerimiento (Pissa, 2015)
 - c. En la etapa de perforación del pozo existen dos fases: la percusión y la rotación.

Percusión	Rotación
<ul style="list-style-type: none"> • Izada y caída de tubos de perforación • Es un juego de polea con balancín que deja caer un peso para romper la roca y crear una perforación que dará paso al pozo. 	<ul style="list-style-type: none"> • La broca gira • Se desprende material rocoso debido a la fricción ocasionada por la broca.

- e) **Etapa posterior a la perforación:** En esta etapa, se debe limpiar el pozo de lodo y otros materiales.
- a. Se debe introducir agua limpia en el pozo usando el sistema de bomba de lodos para ir limpiando la perforación recién hecha.
 - b. Una vez realizada la limpieza del pozo se debe retirar el sistema de tubos de perforación. Para esto:
 - i. Se asegura el primer tubo con una mordaza, para que este no se caiga dentro del pozo
 - ii. Se retira el sistema de inyección de lodos
 - iii. Se retira la manija utilizada
 - iv. Se retira tubo por tubo hasta llegar hasta la broca.
 - c. Para evitar un colapso de las paredes del pozo se suele entubar las mismas. Para esto, se utiliza tubería perforada. Esta tubería a la vez sirve de filtro. Mientras se entuba el pozo se debe continuar con la introducción de agua limpia con el sistema de bombas de lodos. Esto, para evitar la penetración del agua del acuífero a través de la tubería (Bellido, 2004).
 - d. Luego de la instalación de la tubería en el pozo se debe limpiar con agua a presión el mismo.
 - e. La activación del pozo se debe realiza mediante un tubo de polietileno de $\frac{1}{2}$ pulgada o de $\frac{3}{4}$ de pulgada y el largo de este debe ser hasta el fondo del pozo. Se puede rellenar el mismo con arena gredosa que actuará como filtro de impurezas para el agua (Bellido, 2004).

Programa De Protección De Aguas Subterráneas Protocolo de prevención de la contaminación de aguas subterráneas

Prevenir la contaminación de aguas subterráneas es importante debido a que las medidas paliativas en el caso de que esta llegue a niveles críticos son muchas veces inefectivas. Por esta razón, la prevención es extremadamente importante en el cuidado de los acuíferos.

Las fuentes de contaminación a evitar son:

- a) Botaderos de basura: Estos producen lixiviados que se infiltran en el terreno y contaminan el agua. Se debe evitar que estén ubicados cerca del acuífero o ubicarlos en zonas impermeables. Se debe tener particular atención con los desechos industriales (Sauquillo A. , 1994).
- b) Correcto manejo y tratamiento de aguas residuales: Esto debido a que estos desechos de no ser tratados pueden infiltrarse al acuífero y producir contaminación. Se deben construir fosas sépticas y utilizarlas correctamente (Foster, Hirata, Gomes, & Paris, 2002)
- c) Manejo correcto y mesurado de plaguicidas y fertilizantes: Esto debido a que estos resultan tóxicos y pueden infiltrarse en el suelo y desmejorar la calidad del agua.
- d) Otra manera de prevenir la contaminación en las aguas subterráneas es realizando estudios hidrogeológicos adecuados y delimitando un área de protección.

El concepto de un perímetro de protección de la fuente de agua potable está presente en códigos europeos y estadounidenses desde hace algún tiempo. Sin embargo, este no existe en el país. Esto es necesario para proteger a la fuente hídrica de fuentes de contaminación (Foster, Hirata, Gomes, & Paris, 2002).

Para delimitar esta área se debe tomar en cuenta

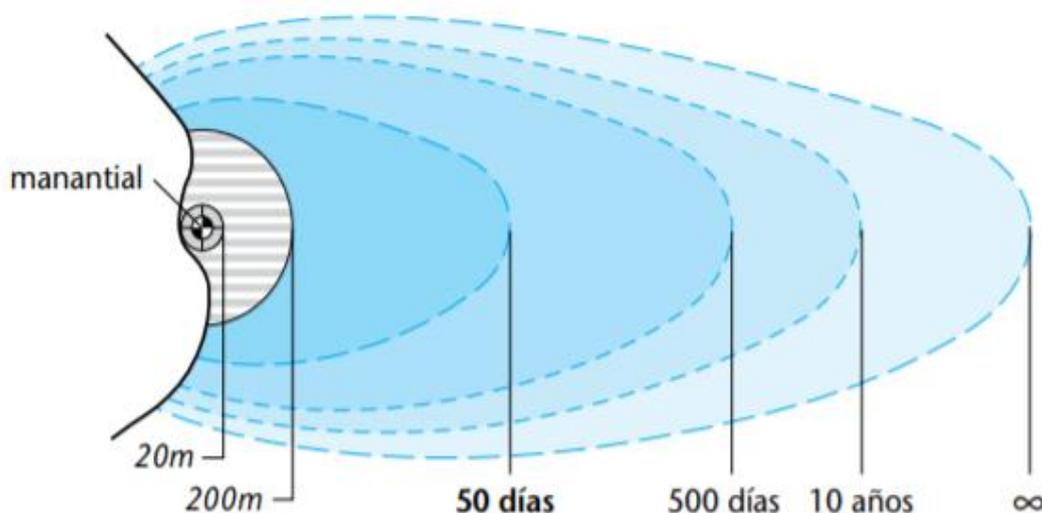
- El tiempo de flujo horizontal en la zona saturada del acuífero hasta el punto de extracción
- Si la explotación se realiza de manera subsuperficial a la fuente hídrica

A partir de estos criterios se traza un área en la cual se deberán prohibir toda actividad contaminante. De no ser esto posible, se deberá al menos limitar este tipo de actividades en áreas más críticas.

Las áreas más críticas de protección serían:

- Área total de captura de la fuente: Es el perímetro que abarca toda el área que recarga el acuífero. Esta se determina considerando el balance hídrico del acuífero y geoméricamente por medio de trayectorias de flujo subterráneo (Foster, Hirata, Gomes, & Paris, 2002).
- Área de protección microbiológica: Esta es importante porque es clave para prevenir la contaminación del agua por virus, agentes patógenos y parásitos. En esta área se debe prohibir vertidos de aguas residuales o cloacales de cualquier tipo. Para determinar esta área se utiliza la distancia equivalente al promedio de un tiempo de flujo horizontal en la zona saturada del acuífero. Esto varía en diferentes normas, pero se recomienda utilizar 50 días (Foster, Hirata, Gomes, & Paris, 2002).
- Zona operacional del pozo: es una pequeña área de terreno alrededor del punto de extracción. En esta área no se debe permitir ninguna otra actividad que no sea la extracción propiamente. Debe tener un radio de al menos 20 metros. (Foster, Hirata, Gomes, & Paris, 2002).

Figura 47: Perímetros de protección del pozo



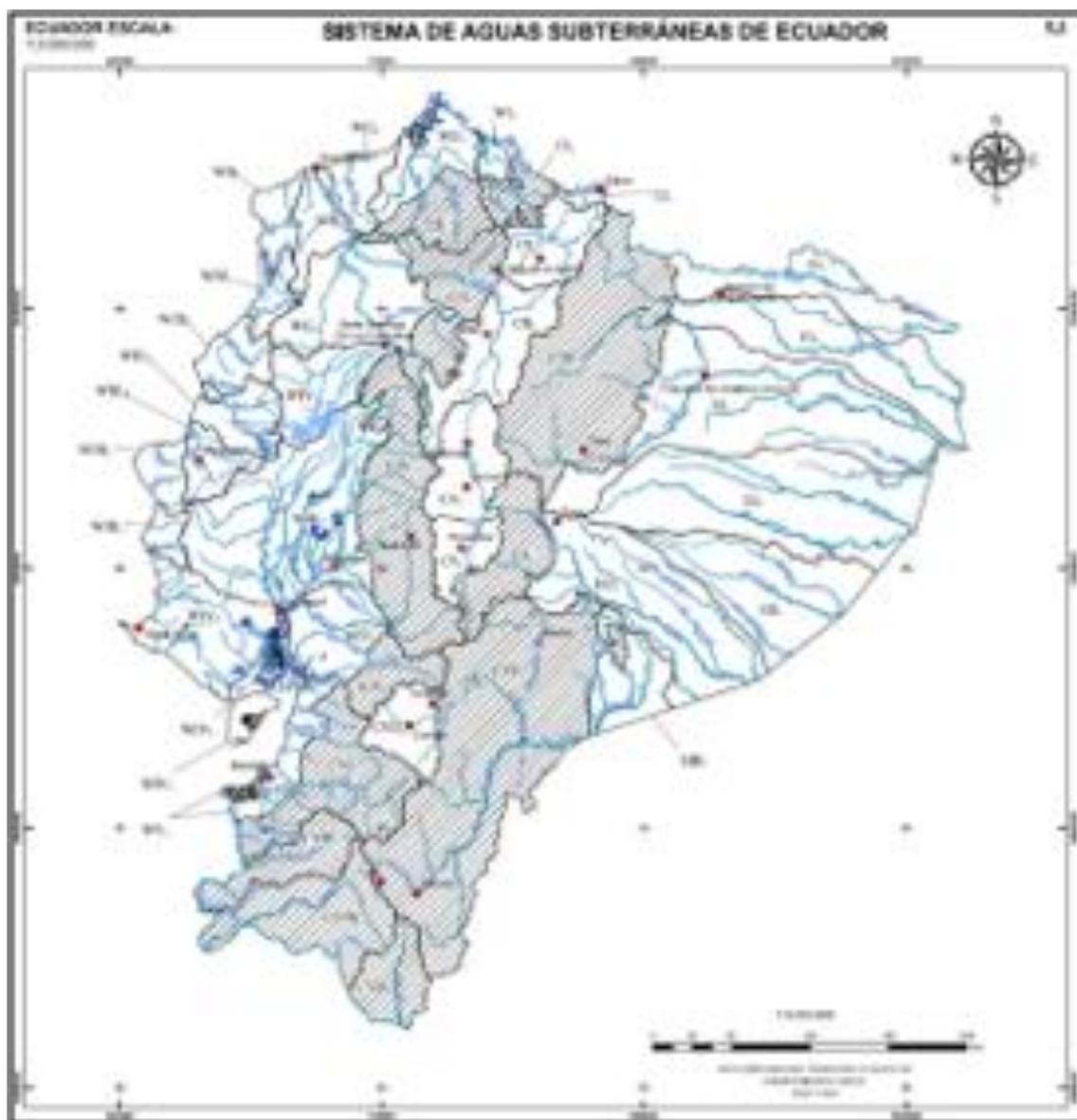
Fuente: (Foster, Hirata, Gomes, & Paris, 2002)

Protocolo para la Prevención De La Intrusión Salina.

La prevención de la contaminación por intrusión salina en un acuífero es fundamental si es que el acuífero costero que está siendo explotado es vulnerable a esta. Además, del diagnóstico oportuno de este problema ya que en etapas tempranas puede ser controlado. Para controlar o prevenir la intrusión salina hay ciertas medidas que se pueden tomar como:

1. Disminución de la explotación del recurso hídrico en el acuífero
2. Encontrar una locación más favorable para los puntos de bombeo.
3. Realizar una recarga artificial para aumentar el nivel de agua dulce en el acuífero.
4. Construir barreras físicas
5. Realizar un constante monitoreo hidrogeológico e hidro químico.

Figura 48: Sistema de aguas subterráneas de Ecuador



Fuente: (CISPDR, 2016)

Las aguas subterráneas representan la única fuente de agua para algunos sectores en el país. Esto principalmente en sectores que tienen un déficit hídrico por falta de aguas superficiales. Así, se conoce que en la región costa del Ecuador existen acuíferos aluviales, estos son extensos y cuentan con una permeabilidad que variable.

Por otro lado, en la sierra también se encuentran acuíferos, sin embargo, en esta región los mismos son acuíferos locales no continuados. Estos se encuentran siendo explotados sin ningún control en la actualidad (SENAGUA, 2016).

Protocolo para la Prevención de la Sobreexplotación del acuífero

La sobre explotación del acuífero se debe evitar, sobre todo por la vulnerabilidad de este a la intrusión salina debido a su locación en zona costeras. Además, debido al posicionamiento del acuífero y su explotación en una zona semi-árida en la cual el recurso hídrico por medio de otras fuentes es escaso, la sobre explotación es probable (Pulido, 2018).

Para esto se deben tomar ciertas precauciones entre las cuáles se resaltan.

- Controlar la explotación de nuevos pozos: Se debe planificar y analizar los sitios de nueva extracción y prohibir la explotación descuidada y sin control de nuevos pozos (Pulido, 2018).
- Controlar sobre bombeos: Para estos se debe organizar un sistema de control permanente y rutinario de los pozos existentes, cuidando que estos no excedan la explotación planificada del recurso (Pulido, 2018).
- Determinar zonas propicias para explotación del recurso: Para esto se debe realizar un estudio que determine la distribución tridimensional del recurso hídrico en el acuífero y a partir de esto determinar las áreas más propicias para la explotación del recurso (Foster, Hirata, Gomes, & Paris, 2002).
- Recarga Artificial: de detectarse problemas de sobre explotación en el acuífero se debe recargar el acuífero de manera artificial utilizando aguas depuradas y limitando la explotación temporalmente (Pulido, 2018).

Métodos para trabajar con autoridades y normativa vigente de protección de aguas subterráneas

No existe una normativa vigente para la protección de aguas subterráneas a pesar de que la Ley de Recursos Hídricos, Usos y de Aprovechamiento de Aguas vigente en Ecuador expongá que se deben dar lineamientos para la explotación del recurso hídrico subterráneo. Existe un proyecto para crear estos lineamientos en la entidad de control SENAGUA. En este caso, las autoridades competentes deberían dar celeridad a la publicación de esta normativa que sería útil para garantizar la explotación sustentable de las aguas subterráneas y evitar que exista mayor contaminación o mala explotación del recurso.

En la actualidad, se solicita una licencia de explotación, pero los controles rutinarios son deficientes y deberían volverse efectivos en el control de la explotación de pozos, así como de su correcta construcción.

Métodos para socializar a la población del cuidado del recurso

Es importante que la población que da uso al recurso hídrico se concientice de la importancia de este y aplique buenas prácticas de consumo, sobre todo si la extracción de agua no proviene de una fuente tecnificada.

Estos valores de cuidado hacia el recurso hídrico se deben conformar mediante la socialización de estos. De esta forma la educación de la ciudadanía en valores ambientales puede garantizar una mejora en las prácticas extractivas del recurso hídrico (Vargas & Estupiñán, 2012).

Los métodos para utilizar para lograr una correcta socialización de estos valores son variados.

Entre estos se encuentran:

- Actividades lúdicas que inviten a la comunidad e informen sobre la importancia del recurso y buenas prácticas de manejo de este (Vargas & Estupiñán, 2012)
- Educación en escuelas y colegios con respecto a la importancia del recurso hídrico y su cuidado.
- Educación en las comunas sobre las malas prácticas actuales y como cambiarlas, esto a través de talleres de buenas prácticas de construcción de pozos, importancia del perímetro de protección, buenas prácticas sanitarias y prevención de contaminación del recurso hídrico subterráneo debido a virus, bacterias y parásitos.

Además de todo esto se debería educar a la población con respecto a la normativa a cumplirse para la protección del acuífero. Sin embargo, esta aún no se publica.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Conclusiones

En este trabajo de investigación se corroboró que el tipo de uso primario del agua de la población rural de Santa Elena es consuntivo, es decir, de uso doméstico y agrícola y que en la actualidad no existe un uso industrial del agua. La proyección estimada de demanda de agua para riego y consumo doméstico es de $107.3 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el año 2040. Sin embargo, existen planes de expansión de área cultivable en la zona los cuales cambian drásticamente los patrones de consumo en la zona.

Adicionalmente, las demandas futuras de estas comunidades se determinaron en base a proyecciones matemáticas y se obtuvieron los resultados mostrados en las Tablas 11 y 12. Así, los valores obtenidos parecen ser ligeramente menores que los que CISPDR analizó para el sector rural de 200 l/hab/día para el 2035. En cuanto a la proyección de demanda de agua para cultivos se obtuvo una demanda de $1050 \text{ m}^3/\text{ha}$. Este disminuyo de la demanda inicial es debido a una reducción en los porcentajes de pérdidas; a su vez, debido a que se planean incrementos en la eficiencia de los sistemas de riego públicos.

Juntamente con la demanda de agua, se determinó la tasa de recarga del acuífero en $53.3 \text{ hm}^3/\text{año}$, y adicionalmente se realizó una aproximación a la interacción del acuífero con las aguas subterráneas, de esta se concluyó que el aporte de estas es despreciable en comparación con el aporte que representa la infiltración de agua debido a la lluvia.

Se concluye que el recurso hídrico disponible en el acuífero “Atahualpa” puede abastecer las necesidades de las comunidades rurales del cantón Santa Elena de manera sustentable hasta el año 2040 si se toma en cuenta un consumo doméstico únicamente. El

consumo es sustentable para el período planteado ya que la demanda de uso domestico para el año 2040 es de $16.6 \text{ hm}^3/\text{año}$.. Sin embargo, considerando la demanda de agua para riego no es sustentable. Esto debido a que la demanda total del sector sería de $107.7 \text{ hm}^3/\text{año}$, es decir, casi el doble de la recarga anual del acuífero. Es decir, es imperativo buscar otras fuentes de agua para abastecer el agua de cultivo.

Además, se estableció un protocolo a tomar en cuenta para aprobar la construcción de un pozo: antes, durante y después de la construcción. Los parámetros establecidos en este protocolo son los mínimos a tomar para perforar pozos manualmente y no aplicables de ser la perforación de un modo no establecido.

En este trabajo también se realizaron una serie de lineamientos para proteger áreas cerca del pozo. Las áreas por proteger dependen del tiempo de flujo horizontal y las medidas a tomarse en esta área son más restrictivas conforme se acerca al punto de extracción. Se determinó que es de extrema importancia implantar estas medidas de protección debido a que ya existen rastros de contaminación en el acuífero.

Debido a la alta probabilidad de sobreexplotación en el acuífero se crearon directrices para mejorar las prácticas de extracción de aguas subterráneas en forma de Manuales de Prevención, estas involucran a la autoridad competente, una mejora en la construcción de pozos y el involucramiento de la población.

Factores como la sobreexplotación del acuífero lo dejan vulnerables a la presencia de intrusión salina. Se determinaron elevados niveles de salinidad en el acuífero tanto en un estudio de 1989 como en un estudio más reciente lo cual advierte de que son necesarios estudios de calidad del agua para determinar la causa del exceso de salinidad. Además, se advierte que el agua tiene un exceso de sólidos disueltos, lo cual indica la presencia de

focos verticales de contaminación. Esto puede deberse a pozos abandonados que no fueron dispuestos adecuadamente.

Al determinarse que los pozos en la zona no son tecnificados, se determinaron una serie de metodologías para socializar la importancia y el cuidado del agua subterránea con la población para prevenir la contaminación del acuífero como son: Actividades lúdicas, información en comunas y juntas de agua y educación en escuelas y colegios.

Recomendaciones

Para mejorar las investigaciones futuras en temas relacionados, se recomienda un mayor control desde la autoridad competente a los pozos, para de esta manera obtener datos más certeros sobre la calidad de agua y las características mismas de los pozos.

Además, resulta necesaria una nueva metodología para el cálculo del consumo de agua debido a riego, el método usado en Ecuador y al que se remite este documento está basado en un modelo del sur de China, esto puede acarrear problemas de exactitud debido a la diferencia de tipo de cultivos. Para esto es necesaria una investigación sobre el tipo de cultivo y los caudales necesarios para este por hectárea.

Asimismo, se recomienda una investigación más profunda sobre el origen del exceso de salinidad en las aguas de los pozos verificado. Esto debido a que el problema a tratar podría ser intrusión salina, en cuyo caso se debería limitar la explotación de este acuífero.

Adicionalmente, se sugiere realizar un estudio sobre los ríos intermitentes cercanos al acuífero con el fin de recolectar una mayor cantidad de información necesaria. A partir de esto, se recomienda realizar una nueva investigación con respecto a la interacción entre aguas superficiales y aguas subterráneas con el fin de lograr una mayor exactitud a los resultados dados en este documento.

Se sugiere la creación de áreas protegidas para frenar los problemas de contaminación debido a sólidos disueltos que existen en la actualidad en el acuífero “Atahualpa”. Este sistema deberá limitar ciertas actividades en perímetros especificados alrededor de los pozos operativos.

Además, se recomienda realizar estudios a mayor profundidad sobre las características del acuífero y su nivel de conductividad, así como de las velocidades de tiempo de flujo horizontal. Esto con el fin de realizar estudios de mayor exactitud sobre el estado del acuífero.

Finalmente, se sugiere realizar un nuevo estudio sobre la interacción del acuífero con las aguas superficiales. Esto utilizando métodos que conlleven datos experimentales para garantizar una mayor exactitud.

Bibliografía

- Arocha, R. (1980). *Abastecimiento de agua (Teoría y Diseño)*. Caracas: Vegas.
- Bellido, A. (2004). *MANUAL DE PERFORACIÓN MANUAL DE POZOS Y EQUIPAMIENTO DE BOMBAS MANUALES*. Lima: Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental.
- Budyco, M. (1974). *Climate and life*. Academic Press NY, 508 pp.
- CEDEX. (1989). Anexo 2 : Aguas Subterráneas. En M. O. Urbanismo, *Plan Nacional de los Recursos Hidráulicos de la República del Ecuador*. Quito: CEDEX.
- CEPAL. (2012). *Diagnóstico estadísticas de Agua en Ecuador*. Quito: CEPAL.
- Changjiang Institute of Survey, Planning , Design or Research. (2016). *PLAN NACIONAL DE LA GESTIÓN INTEGRADA E INTEGRAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LAS CUENCAS Y MICROCUENCAS DEL ECUADOR*. Quito.
- CISPDR. (2016). *Plan Hidráulico Regional de la Demarcación Geográfica Guayas*. SENAGUA.
- Coduto, D. (1999). *Geotechnical Engineering Principles and Practices*. Pomona: California State University.
- Estrada, O. (2009). *MODELACIÓN ACOPLADA AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS PARA LA GESTIÓN CONJUTA DEL RECURSO HÍDRICO*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- FAO. (2014). Producción de Cultivos. En G. Branca, & otros, *Bioenergía y Seguridad Alimentaria: Evaluación Rápida* (págs. 1-44). FAO.

- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., & Paris, M. (2002). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea*. Global Water Partnership.
- García, M., & Madurga, M. (1998). *Impacto de Pozos Abandonados sobre Calidad de Aguas Subterráneas*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Heras, M. (1970). *Manual de Hidrología*. Madrid: Centro de Estudios Hidrográficos.
- Ibañez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (sf). *Métodos para la Determinación del Coeficiente de Escorrentía*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- INAHMI. (2011). *Anuario Meteorológico del Ecuador*. Quito : INAHMI.
- Isaar, A., & Lerner, D. (1990). Groundwater Recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. International Association of Hydrogeologists.
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento de Agua (21 de Agosto de 2015).
- Ordoñez, J. (2011). *Aguas Subterráneas- Acuíferos*. Lima: Global Water Partnership.
- Pissa, S. (2015). *Guía Básica Construcción Pozos Profundos en Colombia*. Pereira.
- Pizarro, R. (sf). *Curvas de Infiltración*. Universidad Austral de Chile.
- Pulido, A. (2018). *Sobreexplotación de Acuíferos y Desarrollo Sostenible*. Almería: Universidad de Almería.
- Rodríguez, C. (2014). *CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS CUENCAS DE LOS RIOS JAVITA Y ZAPOTAL DE LA PROVINCIA DE SANTA ELENA*. Quito: UCE.
- Sanchez, F. (2007). *Hidrogeología: Conceptos Fundamentales*. Salamanca: Universidad de Salamanca.

- Sauquillo, A. (1994). *Contaminación Aguas Subterráneas: Situación España*. Valencia: Politécnica de Valencia.
- Sauquillo, A. (1994). *LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS*. Valencia: Departamento de Ing. Hidráulica y Medio Ambiente Universidad Politécnica de Valencia.
- Scanlon, F., Healy, W., & Cook, P. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hidrogeology Journal*, 18-39.
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). Modelo Analítico para Determinar la Infiltración con Base a la Lluvia Mensual. *Revista UCR*.
- Terán, P. (2018). *Programa de Capacitación Técnica e implementación del Proyecto de Fortalecimiento de las Escuelas del Agua: Intrusión Salina*. Quito: SENAGUA.
- UNESCO. (2009). *Water in a Changing World*. Paris: UNESCO.
- Universidad de Memphis. (2016). *Provision of Drinking Water and Underground Water Priority Areas*.
- Vargas, C., & Estupiñán, M. R. (2012). *Estrategias para la Educación Ambiental*. Manizales.
- Vélez, M. (1999). En *Hidráulica de Aguas Subterráneas* (págs. 32-50). Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Vidal-Abarca, M. (2004). Ríos de las Regiones Semiáridas. *ECOSISTEMAS*, 18-26.