

ARTÍCULO 4

Recibido: 18/4/2022

Aprobado: 9/6/2022

Caracterización hidrogeológica, estimación y clasificación hidroquímica de las masas de agua subterránea de la ciudad de Yacuiba.

Hydrogeological characterization, estimation and hydrochemical classification of groundwater masses in the city of Yacuiba.

Gina Analía Palacios Méndez ¹, Julio César Mamani Alemán ²

¹ Estudiante de la carrera de Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

² Ingeniero de Recursos Hídricos, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Master in hydrology and management of water resources - University of Alcalá and King Juan Carlos University

Correspondencia del autor(es): carigina96@gmail.com¹, julio.mamani@edu.uah.es²

Resumen

Este documento contiene un análisis descriptivo sobre la calidad de las masas de aguas subterráneas de la ciudad de Yacuiba, para este análisis se utilizaron datos de los 21 pozos utilizados para la explotación de agua subterránea en esta zona, los cuales tienen un registro histórico de tres periodos de inscripción, siendo estos dos periodos en la gestión 2020 y un periodo comprendido en el mes de febrero del año 2021.

Por otro lado, este estudio describe el predominio de masas de agua “magnesio-cálcicas” con una característica dura, pero aceptable dentro de los parámetros establecidos en la norma boliviana 512, tomando en cuenta que estas aguas son usadas para la dotación de agua potable de la ciudad de Yacuiba. También fue posible identificar 10 tipos de acuíferos, estos identificados con base en del “pH” de cada una de las muestras, que además describen, mediante el software Aquachem 4.0, los beneficios de cada una de las masas de agua subterránea identificadas.

Asimismo, se hace una descripción de los procesos geomorfológicos, características hidrológicas que describen la naturaleza del área,

sin olvidar las características geológicas y litológicas que nos dan una idea clara sobre la formación de los acuíferos en la zona.

Palabras clave: Aguas subterráneas, caracterización, clasificación hidroquímica, masas de agua, hidrogeología y acuífero.

Abstract

This document contains a descriptive analysis of the quality of the groundwater bodies of the city of Yacuiba. For this analysis, data from the 21 wells used for the exploitation of groundwater in this area were used, which have a historical record of three registration periods, these two periods being in the 2020 management and a period comprised in the month of February of the year 2021.

On the other hand, this study describes the predominance of “magnesium-calcium” water masses with a hard characteristic, but acceptable within the parameters established in the Bolivian standard 512, taking into account that these waters are used for the provision of drinking water. from the city of

Yacuiba. It was also possible to identify 10 types of aquifers, these identified based on the “pH” of each of the samples, which also describe, through the Aquachem 4.0 software, the benefits of each of the identified groundwater bodies.

Likewise, a description is made of the geomorphological processes, hydrological characteristics that describe the nature of the area, without forgetting the geological and lithological characteristics that give us a clear idea about the formation of aquifers in the area.

Key words Groundwater, characterization, hydrochemical classification, water masses, hydrogeology and aquifer.

1. Introducción

El agua cubre más del 70 % de la superficie del planeta; se la encuentra en océanos, lagos, ríos; en el aire, en el suelo. Es la fuente y el sustento de la vida, contribuye a regular el clima del mundo y con su fuerza formidable modela la tierra. Posee propiedades únicas que la hacen esencial para la vida. Es un material flexible: un solvente extraordinario, un reactivo ideal en muchos procesos metabólicos; tiene una gran capacidad calorífica y tiene la propiedad de expandirse cuando se congela.

Los océanos dan cuenta de casi el 97,5 % del agua del planeta. Únicamente un 2,5% es agua dulce. Los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares representan casi el 80% del agua dulce, el agua subterránea 19% y el agua de superficie accesible rápidamente sólo el 1%. Esta baja cantidad de agua de superficie fácilmente accesible, se encuentra principalmente en lagos (52%) y humedales (38%). (Auge, 2007; Viva, 2012).

El agua subterránea es una parte esencial del ciclo hidrológico, aunque en general ha sido poco considerada hasta épocas relativamente recientes.

Su existencia tiene notables implicaciones geológicas, geotécnicas, edafológicas, ecológicas y de servicios ecológicos y también es una fuente de provisión de agua a las necesidades humanas. (Custodio G. Emilio y Llamas M. Ramón, 2015).

Ahora si bien se conocen distintos puntos de vista desde la importancia del agua como sustento de vida, como también la importancia de las aguas

subterráneas, esto implica conocer a detalle las características que influye su estudio, explotación y aceptación en una nueva era de búsqueda de alternativas de fuentes de agua para el sustento de vida.

Las zonas más áridas del mundo se ven limitadas a buscar todas las alternativas posibles para poder subsistir en estos ecosistemas, pues la gran mayoría de ellas apuntan a la explotación de las aguas subterráneas.

Así también en el Chaco tripartito entre Argentina, Bolivia y Paraguay, actualmente y con el pasar de los siglos fueron y son grandes maestros en el arte de la explotación de las aguas de origen subterráneo.

Actualmente ciudades importantes como Villa Montes y Yacuiba, pertenecientes a poblados importantes de las tierras del chaco boliviano, subsisten gracias a la explotación de las aguas subterráneas.

Estos recursos se proyectan a ser de gran importancia para una explotación medida y de gran importancia para la expansión de la frontera agrícola, como también para el mejoramiento de los medios de vida y economía de la región.

Es por tanto que, dentro de la conceptualización general, se tienen que suponer la importancia de estudiar y profundizar los conocimientos empíricos de los medios acuíferos de la región chaqueña, por tanto, el presente estudio se basa a proponer una nueva visión de gestión de los recursos hídricos, siendo esta vez el enfoque en las aguas subterráneas.

Los parámetros más importantes usados dentro de la investigación refieren a los parámetros mínimos y básicos establecidos en la norma boliviana 512 de calidad de aguas.

Entender la importancia de las aguas subterráneas en el Chaco Boliviano y en especial en la ciudad de Yacuiba, conlleva una serie de análisis, los cuales se basan en que el 85% de estas aguas subterráneas son el sustento hídrico para una población que ronda los 98.000 habitantes, teniendo un aprovechamiento superficial mínimo que se aproxima al 15% del agua potable producida por EMAPYC.

2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción del ámbito espacial de la zona de estudio

El ámbito espacial de estudio para nuestra investigación es la ciudad de Yacuiba, establecida en el municipio del mismo nombre, perteneciente a la primera sección de la provincia Gran Chaco del departamento de Tarija del Estado Plurinacional de Bolivia.

2.2. Fuente de datos

La fuente de datos primarios se engloba en documentación hidrogeológica, geológica y de calidad de agua de los pozos establecidos en el municipio de Yacuiba, esta proporcionada por EMAPYC, quien es la entidad gestora de este servicio, además de ello se rescatarán artículos y referencias bibliográficas referentes a la zona de estudio estos generados por YPF. Para mejor entendimiento también referimos las referencias bibliográficas transversales en el marco referencial descrito con anterioridad.

La fuente de datos secundarios son aportes periodísticos y aportes teóricos desarrollados por distintos autores, que puede ser de orden general, pero no así propio de la zona. También se considera como base o fuente de datos secundarios a los aportes teóricos de la OTN, oficina nacional de los ríos Bermejo y Pilcomayo, ya que este municipio también forma parte de los afluentes principales de la cuenca del río Pilcomayo, enfocando su interés en las aguas de origen superficial y subterráneo de la zona en cuestión.

2.3. Objetivo de la investigación

Para la presente investigación, se tomaron como datos fundamentales, el registro de 21 pozos utilizados como fuentes de agua abastecimiento para suministro de agua potable de la ciudad de Yacuiba, estos administrados por la “Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Yacuiba” – EMAPYC, la utilización de estos datos tiene como finalidad “Estimar, caracterizar la hidrogeología, clasificación hidroquímica de las masas de aguas subterráneas

pertenecientes a la ciudad de Yacuiba”. para identificar su procedencia u origen.

Para ello en la investigación se propuso el análisis de varios escenarios, entre los que podemos describir los siguientes.

- ⊙ Caracterización de la microcuenca de estudio.
- ⊙ Rasgos morfométricos de la ciudad de Yacuiba.
- ⊙ Hidrología.
- ⊙ Estratigrafía.
- ⊙ Geología estructural

2.4. Caracterización de la microcuenca de estudio.

La importancia de un análisis morfológico de cuencas está en el hecho de que deben identificar los índices y magnitudes físicas de la cuenca, que se expresan en términos simples de valores medios de ciertas características del terreno, los cuales juegan un papel importante como condicionantes de su régimen hidrológico.

El análisis de estas características morfométricas mediante parámetros de forma, relieve y red de drenaje son básicos para realizar modelaciones hidrogeológicas que aporten en la determinación del movimiento y captación del agua de lluvia y el drenaje en general. J. Gaspari (2009).

2.4.1. Delimitación de la cuenca de interés.

Es importante señalar que para poder determinar los parámetros de la microcuenca, el primer paso es la obtención del límite de la cuenca o microcuencas de estudio, por tanto cabe señalar que se empleó el modelo de elevación digital de terreno, que tiene valores de altitud y la extensión ARCVIEW y ARCSWAT, la definición de esta cuenca es básica para entender el sentido de fluidez de las aguas superficiales y considerar un flujo hidrodinámico subterráneo, además se consideran los aspectos biofísicos que interactúan en ella, dándole características diferenciadas de otras superficies.

Se pudieron identificar dos cuencas principales de aporte, las cuales son: La cuenca Yuquirenda con 219.59 km² y la cuenca Limítrofe Internacional con 66,74 km².

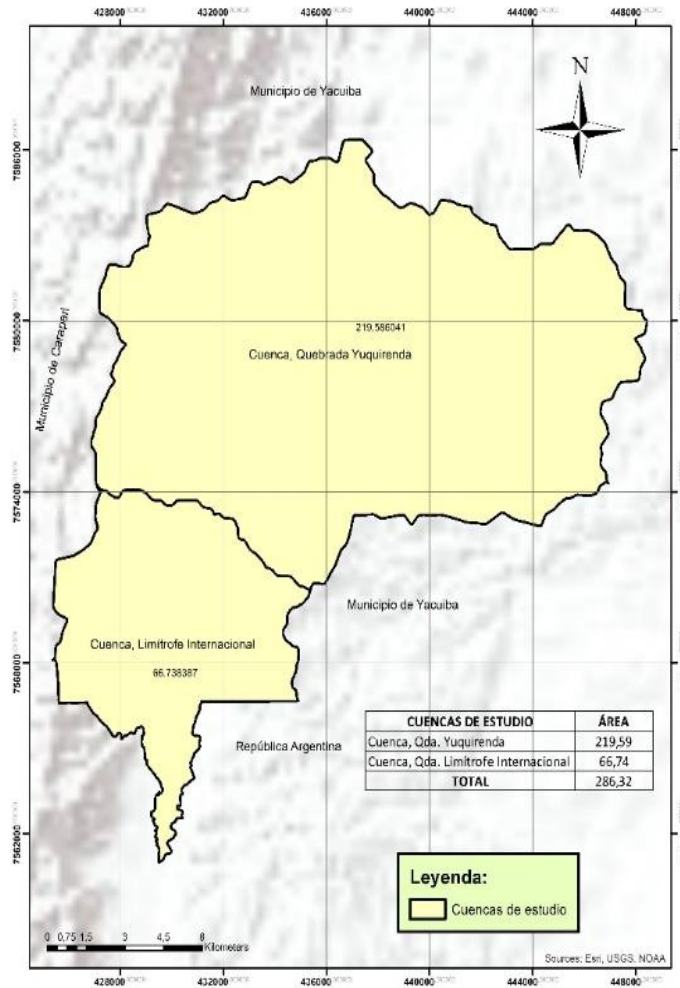


Figura N° 1. Cuencas de interés

2.5. Rasgos morfométricos de la ciudad de Yacuiba.

2.5.1. Caracterización territorial

Descripción	Porcentaje	Área (km ²)
Cuenca baja	81,56%	229,19
Cuenca media	15,36%	43,15
Cuenca alta	3,33%	9,35
Totales	100%	281,69

Tabla N° 1. Caracterización territorial – distribución de la cuenca.

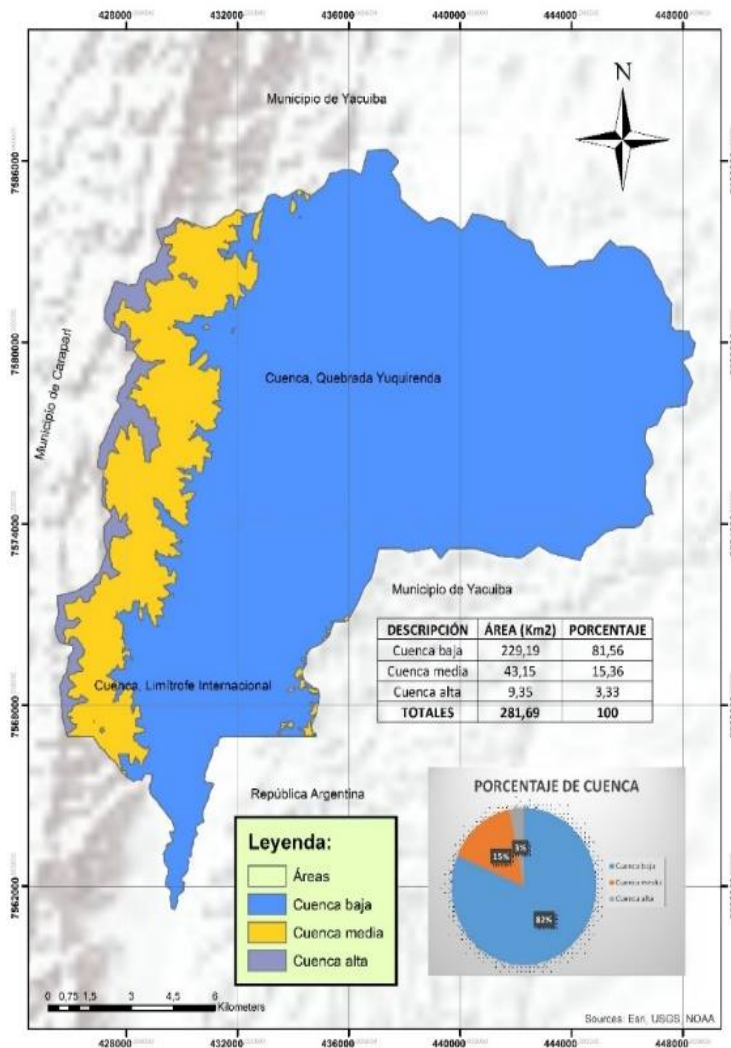


Figura N° 2. Caracterización territorial

2.5.2. Ubicación de la cuenca

COORDENADAS UTM		
Punto más bajo	429018,17 m E	7583689,94 m S
Punto más alto	448270,78 m E	7580058,31 m S
COORDENADAS GEOGRÁFICAS		
Punto más bajo	21°50'25,98"	63°41'12,81"
Punto más alto	21°52'26,69"	63°30'02,54"

Tabla N° 2. Ubicación de la cuenca de interés

2.5.3. Análisis multitemporal de la cuenca de interés

En el presente estudio se realizó un análisis multitemporal con empleo de imágenes satelitales LANDSAT, donde se emplearon cuatro imágenes satelitales de diferentes fechas, las cuales se detallan a continuación:

Nombre	Mes de descarga	Bandas descar- gadas	Resolución	Fuente
Landsat 5 TM-1989	Noviembre	7	30 metros	Satélite Landsat
Landsat 5 TM-1999	Octubre	7		
Landsat 5 TM-2008	Diciembre	7		
Landsat 5 TM-2018	Octubre	11		

Tabla N° 3. Lista de imágenes descargadas desde LandSat

Este análisis nos permitió determinar la magnitud del crecimiento poblacional en especial en la subcuenca de límite internacional, como también un incremento moderado en la cuenca de la quebrada Yuquirenda, esta relacionadas con los índices de vulnerabilidad a los acuíferos, en especial a las zonas con alta presencia de actividades antrópicas.

2.5.4. Geomorfología

La geomorfología de la cuenca maestra está compuesta por tres sistemas interesantes, donde se puede observar un encajonamiento en el lado derecho e izquierdo, tomando en cuenta que el área de intervención pertenece a una zona fronteriza, en la cual se denotan grandes variaciones en la serranía el Aguaraquíe, donde se contemplan algunos conos de deyección, estos naturales por el deslizamiento continuo de algunos mantos rocosos en las épocas de precipitación, como también se puede observar la presencia de muy pocas colinas, estas a pie de la Serranía del Aguaraquíe.

Por otra parte, se nota claramente una serie de colinas menores en el lado derecho, siendo esta una serranía perteneciente al territorio argentino, la cual es menor y por su consistencia, la cual pertenece a la era terciaria, con un bosque menos denso y continuo, genera un sistema anticlinal notorio al igual que en el lado izquierdo, donde efectivamente se denota un sistema anticlinal más pronunciado, por otra parte se pueden describir que debido a la existencia de un encajonamiento natural, nuestra área de estudio pertenece a un sistema aluvial compuesto básicamente de areniscas finas e intermedias, las cuales al mezclarse

con algunos suelos someros hacen de este espacio un verdadero edén en épocas de primavera, que se ve demarcado por la presencia de fuertes vientos en épocas de precipitación y concentrando una variabilidad de temperaturas que van desde crudos inviernos a fuertes olas de calor en épocas de verano.

La presencia de los ríos es totalmente escasa, ya que por las condiciones expuestas con anterioridad la presencia de estos cuerpos es totalmente variable, denotando claramente su existencia en temporadas de precipitación, estas por el propio drenaje de las aguas, que por su inclinación natural drenan al lado derecho de nuestra cuenca, escurriendo las aguas de forma directa al territorio argentino.

En el lado noreste de la cuenca se denota claramente el afloramiento de algunos sistemas aluviales con predominancia de pampas arenosas con poca inclinación, estas de igual manera drenan sus aguas al territorio argentino, donde claramente se puede evidenciar la presencia de microclimas, los cuales hacen naturalmente su denotación en épocas de precipitación.

Por otra parte, se debe entender que nuestra área es un sistema compuesto por diversos componentes, desde sistemas vegetativos variados, hasta la formación de sistemas aluviales en su gran mayoría, en la cual se asienta la ciudad de Yacuiba.

Este análisis nos permite asumir que ambas cuencas tienen una dependencia hídrica desde la serranía del Aguaraquíe, siendo esta la zona de recarga hídrica por la descripción de sus altitudes y condiciones naturales. Ver figura 3.

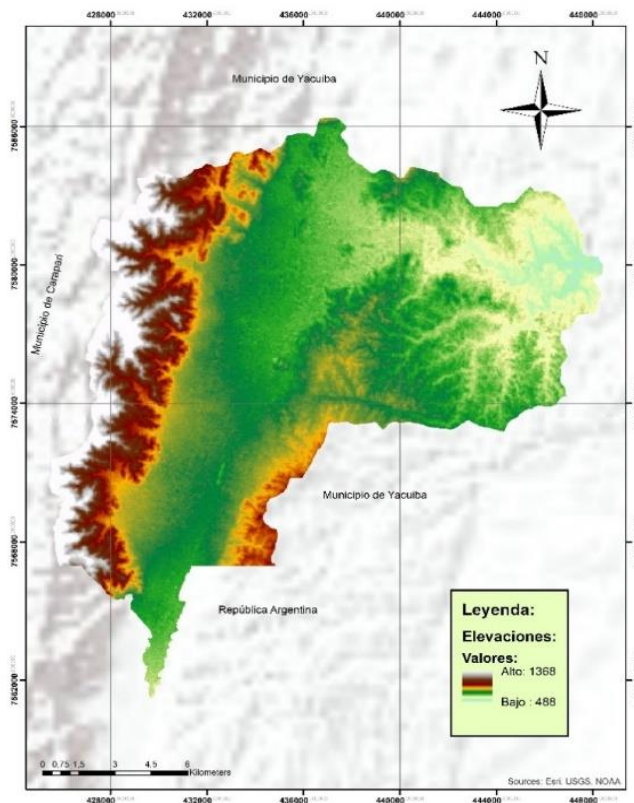


Figura N° 3. Mapa de elevaciones de la cuenca de interés

2.6. Hidrología

2.6.1. Estaciones meteorológicas

Los datos meteorológicos corresponden a la estación ubicada en el Aeropuerto de la ciudad de Yacuiba que maneja el SENAMHI, además de ser la estación meteorológica que cuenta con datos relativamente completos y son fiables para determinar la hidrología de la zona, no siendo necesaria la interpolación de otras estaciones.

Es necesario considerar la incidencia de los datos meteorológicos en los análisis realizados, esto debido a la gran deficiencia en cuanto al registro de datos hidrometeorológicos en nuestro país, pero también se debe considerar estos datos como prioritarios para contar con una análisis más certero y aproximado a la realidad.

PALMAR CHICO	Precipitaciones máximas en 24 hrs, temperatura máxima media, temperatura mínima media y temperatura media.
YACUIBA AEROPUERTO	Precipitaciones máximas en 24 hrs, temperatura máxima media, temperatura mínima media, temperatura media y humedad relativa.

Tabla N° 4. Estaciones meteorológicas utilizadas en las estimaciones.

2.6.2. Balance hídrico

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annual
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
E T P (mm)	138.46	114.30	105.38	73.09	50.93	34.66	34.78	50.19	71.50	107.07	120.22	135.55	1036.13
P (mm)	206.76	184.35	204.11	79.18	23.47	7.09	3.02	3.01	9.97	42.61	107.09	181.56	1040.41
E X C . DEFIC	68.29	70.05	98.73	6.09	-27.45	-27.56	-31.75	-47.18	-61.53	-64.46	-13.13	46.01	4.27

Tabla N° 5. Estimación del balance hídrico.

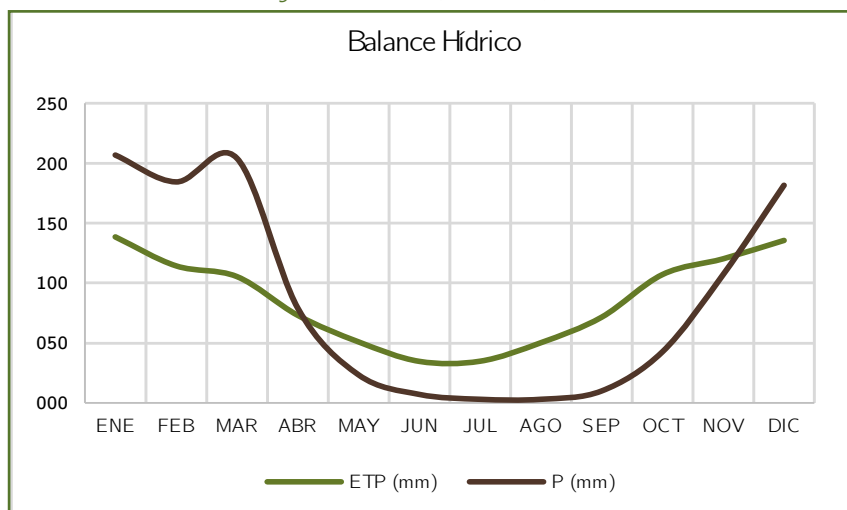


Figura N° 4. Balance hídrico de la zona de interés.

Este análisis nos permite describir el comportamiento de la precipitación en relación al déficit del recurso hídricos debido a la evapotranspiración, donde el análisis nos indica una época con estrés hídricos comprendido entre los mediados de abril hasta inicios del mes de noviembre, atenuándose en el mes de agosto a octubre.

2.7. Estratigrafía

Tal como lo describen los registros geológicos de YPFB, en la zona, afloran principalmente sedimentos no consolidados Cuaternarios de origen fluvial, con un espesor de 1500 a 2000 m, compuestos básicamente por unas alternancias entre arenas, arcillas, limos y gravas con variaciones locales en cuanto a composición y estructura.

Aunque el contacto del Cuaternario con los sedimentos Terciarios es ciertamente difícil de diferenciar, estos últimos presentan una relativa mayor compactación y en algunos casos están cementados por material calcáreo. Por ejemplo, la Formación Petaca del Paleógeno que pertenece al Grupo Chaco está compuesta principalmente

por una arenisca calcárea y conglomerado. En cambio, las rocas más jóvenes están conformadas por areniscas, lutitas, conglomerados y margas y corresponden a las Formaciones Yecua, Tariquia y Guandacay.

Ambos depósitos Cuaternarios y Terciarios son factibles para el aprovechamiento de aguas subterráneas, por lo que la mayoría de los pozos acuíferos de la zona aprovechan estas Formaciones.

Las rocas del cretácico afloran en la zona occidental en el extremo sur del área, las formaciones cajones, yantala e ichoa, las mismas que forman un conjunto de anticlinales y sinclinales angostos, cuya composición litológica predominante está compuesta por areniscas y areniscas calcáreas intercaladas con lutitas hacia el top.

Sistema	Formación	Espesor (m)	Descripción litológica
Cuaternario: Pleistoceno	Aluvial	10 -70	Suelos aluviales, intercalaciones de capas arenosas de granulometría fina a gruesa con arcillas rojizas, el espesor de las capas varia de 1 a 30 metros.
Neógeno: Plioceno Mioceno Paleógeno: Oligoceno	Chaco Superior	1000	Alternancia de capas de arena y gravas, mala selección, unidas con cemento calcáreo débilmente endurecidas, con arcillas y limolitas, gris clara el espesor de las capas arenosas y de arcilla varia de 1 a 30 metros.
	Chaco inferior	670	Alternancia de capas de arena de grano fino a medio unidos con cemento calcáreo endurecido, con capas de arcillas rojizas oscuras y limolitas grises claras, el espesor de las capas de arcillas es de 1 a 20 metros.
	Yacua	300	Predominancia de arcillas rojizas oscuras, verdosas; con espesor de 1 a 5 metros. Intercaladas con delgadas capas de areniscas, calizas y yeso.
	Petaca	200	La base de esta unidad está formada por conglomerado polimíctico brechoso, de color blanquecino y rojizo. Por encima de este conglomerado se tiene alternancia de lutitas y areniscas.
Cretácico	Cajones	50 - 300	Formada por capas de areniscas calcáreas, calizas arenosas, intercaladas con delgadas lentes de lutitas.
	Yantala	110 - 240	Predominancia de granos gruesos a medio subredondeados y de buena selección, friables, porosos y permeables; con escaso matrix limoso, color amarillento.
	Ichoa	150 - 480	Formada por areniscas rojizas, blanquecinas amarillentas y verduscas. Son de grano medio a fino, redondeados, bien seleccionados, de estructura entrecruzada.

Tabla N° 6. Estratigrafía de la zona de interés.

2.8. Geología estructural

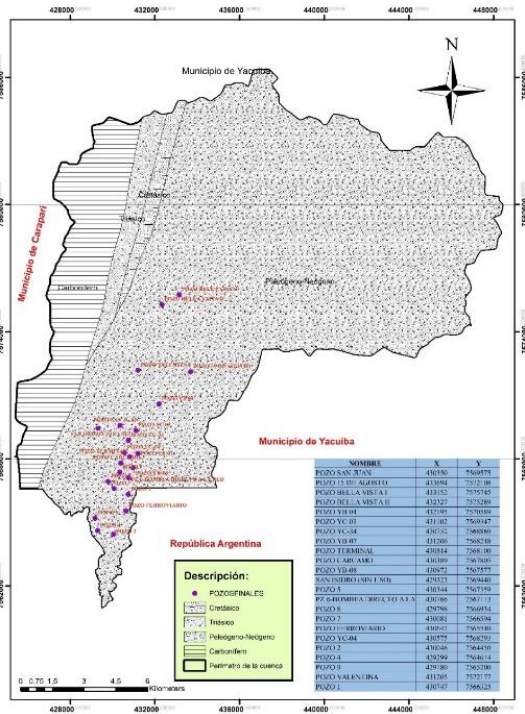


Figura N° 5. Estimación geológica de la zona de interés.

La evolución tectónica del sur de Bolivia, zona Yacuiba, se caracteriza desde el Paleozoico Superior hasta la base del Mesozoico, por una subsidencia casi continua, interrumpida por movimientos epirogénicos que generaron discontinuidades relacionadas con las fases tectónicas terciarias especialmente del Mioceno y Plioceno.

Estas orogenias ocasionaron entre otros el Calbagamiento Frontal Principal dando por resultado, de esta evolución tectónica la distribución de fajas delgadas y plegadas como las sierras de Caipipendi, Charagua y Aguaraque.

Desde la zona del río Chorritos a unos 170 km al Sur de Río Grande, se presentan una serie de anticlinales y sinclinales constituidos por rocas de diferentes sistemas con un rumbo Norte – Sur, ligeramente elongado al Este. Las deformaciones que se registran en las rocas, se deben a diferentes periodos de esfuerzos tectónicos principalmente de dirección E – O que modelaron la zona.

De acuerdo a estudios realizados por YPFB a la altura de la localidad de Florida, muestra una serie de estructuras geológicas tanto en superficie como en el subsuelo, que manifiesta el grado de deformación que tuvieron las rocas durante

los procesos geológicos de formación de la cadena montañosa del Subandino.

Para este estudio sólo se consideran aquellas que revisten importancia para la exploración y captación de acuíferos, entre éstas se encuentran sedimentos Cuaternarios, las formaciones del Grupo Chaco del sistema Terciario y las formaciones Cajones, Yantata e Ichoa del sistema Cretácico. Las rocas del Cretácico afloran en toda la zona occidental, las mismas que forman un conjunto de anticlinales y sinclinales angostos.

La ciudad de Yacuiba se asienta en una zona comprendida por un lecho terrestre perteneciente al sistema del Paleógeno- Neógeno, donde claramente se pueden denotar presencia de áreas y limos finos, los cuales comprenden un pliegue extenso, con características de ser suelos pertenecientes a terrazas aluviales, estas producidas naturalmente por el encajonamiento de las serranías de Aguaraque y la formación sinclinal de la parte argentina.

La ciudad de Yacuiba describe una característica muy interesante, la cual de ahora en adelante y en función a las condiciones geológicas se denominará “zona detrítica”, compuesta por clases de rocas sedimentarias compuestas de fragmentos, o clastos, de roca y minerales pre-existentes acumulados mecánicamente, que se han consolidado en mayor o menor grado, una serie de elementos rocosos arrastrados y/o meteorizados, haciendo de esta zona relativamente apta para la generación de acuíferos de tipología libre y semiconfinados, siendo común la presencia de acuicludos y acuitardos.

3. Resultados y Discusión

En la ciudad de Yacuiba, la Empresa Municipal de Agua y Alcantarillado EMAPYC, quienes bajo su administración cuentan con pozos de extracción de agua para consumo humano, siendo muy poco porcentaje el cual se aprovecha de fuentes superficiales y siendo una predominancia la explotación de agua subterránea desde diferentes puntos de la mancha urbana de la ciudad de Yacuiba.

Estas fuentes subterráneas se caracterizan por ser agua con alta dureza, estando en los límites permisibles dentro de los parámetros estipulados en la Norma Boliviana NB-512. La empresa EMAPYC, aplica metodologías de tratamiento y reducción de estos parámetros mencionados, potabilizando y distribuyendo el agua mediante un sistema matricial de tuberías a toda la mancha urbana de esta mencionada ciudad.

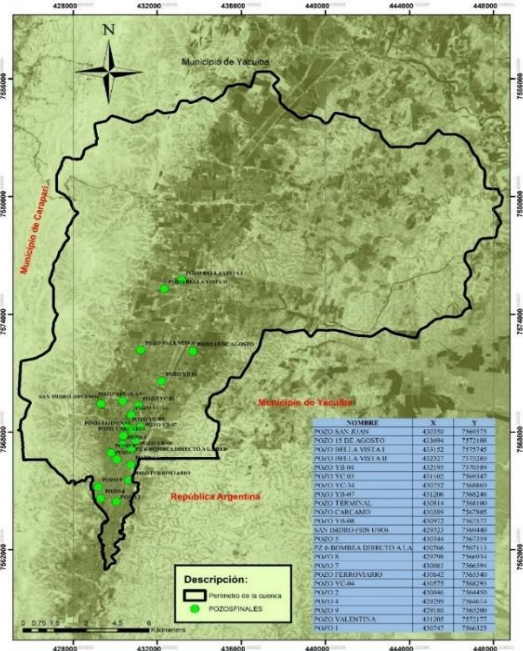


Figura N° 6. Ubicación de los pozos bajo administración de EMAPYC

3.1. Herramientas para la interpretación de la calidad del agua.

Se utilizó la versión 4.0 del software AquaChem, el cual fue calibrado en función a nuestras exigencias, tomando en cuenta la configuración correcta de las unidades establecidas en la Norma Boliviana 512, NB-512, de control de calidad del agua potable, entre ellos los parámetros de dureza y alcalinidad para identificar la procedencia de las aguas, siendo estos Ca, Mg, K, Na, como también otros compuestos químicos como SO₄ y Cloruros.

3.2. Modelación según Schoeller

Si bien la escala logarítmica no es apropiada para observar pequeñas diferencias en la concentración de cada ion entre distintas muestras de agua, sí es útil para representar en un mismo diagrama aguas de baja y de alta salinidad, y observar la relación entre iones asociada con la inclinación de las líneas. A continuación, se describen los diagramas modelados para los tres periodos identificados, en función a los datos del numeral anterior.

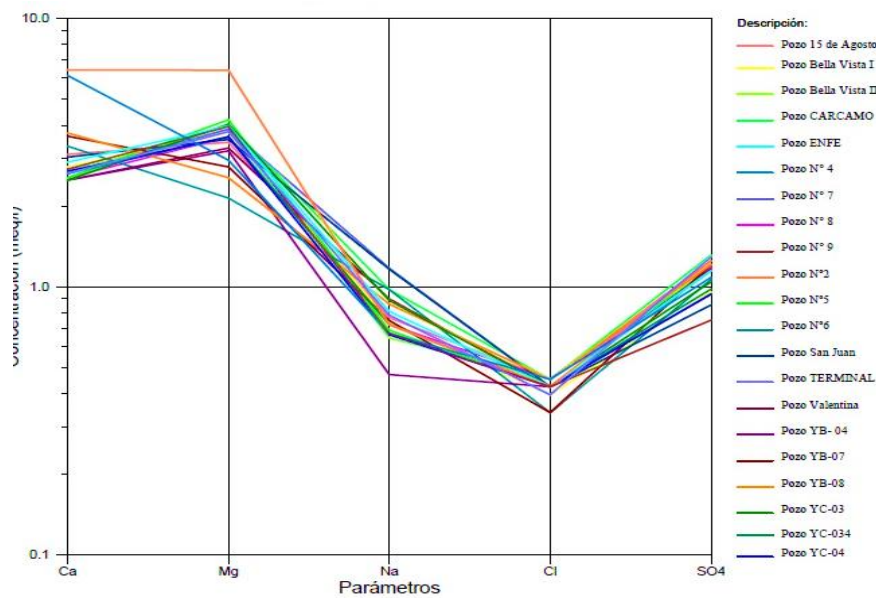


Figura N° 7. Modelación según Schoeller, periodo 1/2020

En este periodo se puede observar un comportamiento hidroquímico semi uniforme, teniendo variaciones Pozo N° 2, el cual registra una variación en la concentración de magnesio y calcio, como también se puede evidenciar un comportamiento similar en la concentración de calcio del Pozo N° 4.

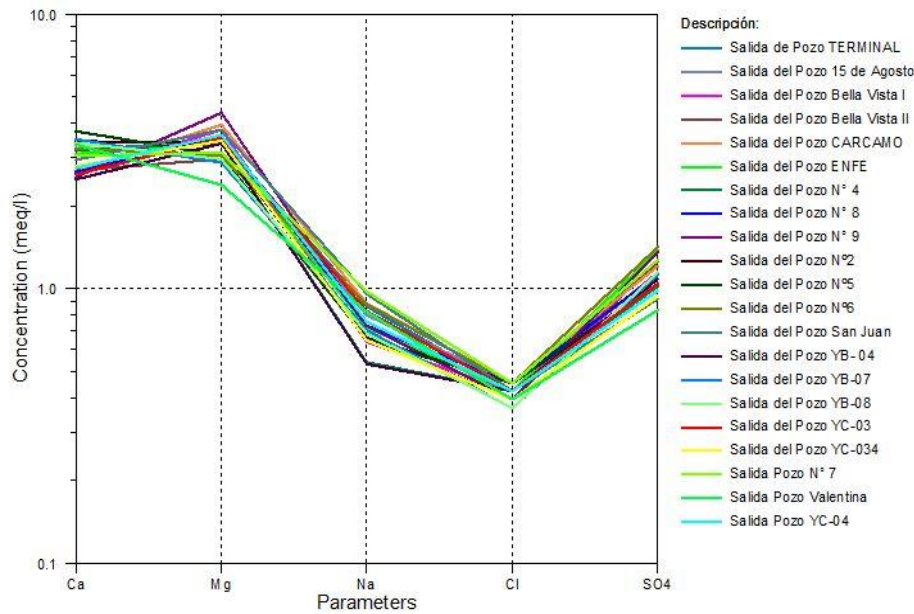


Figura N° 8. Modelación según Schoeller, periodo 2/2020

En el caso de la modelación del segundo periodo, se puede observar un comportamiento uniforme de todas las concentraciones, esta variación o regulación del Mg y Ca mencionados pozos, se asume es por movimiento hidrodinámico ocurrido durante el periodo, Así también se debe entender que las variaciones no son significativas, estando la concentración acorde a los establecido en las NB-512.

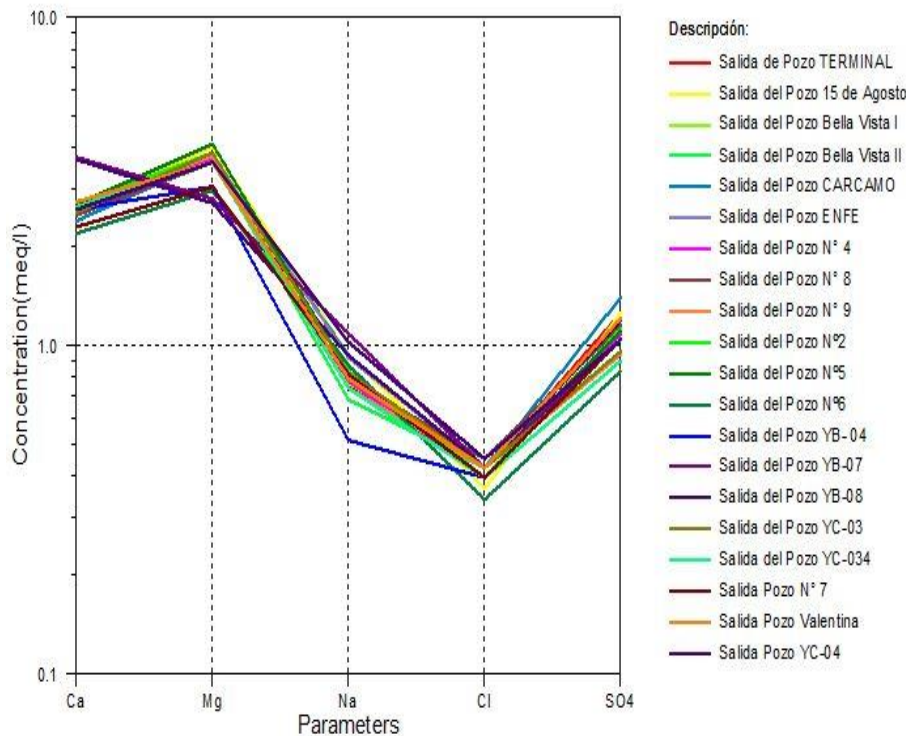


Figura N° 9. Modelación según Schoeller, periodo 1/2021

Es este último periodo se puede observar de igual manera una variación no significativa, notándose gráficamente una variación por la base logarítmica aplicada por el software, pero que no significa problema alguno en la práctica, siendo un agua de calidad aceptable según la legislación boliviana.

3.3. Tipologías de masas de aguas encontradas.

Tras la calibración del software Aquachem 4.0, se pudo identificar una tipología aproximada de las aguas subterráneas encontradas. La identificación es desarrollada gracias a la presencia de cationes y aniones identificados en las muestras.

Tal como se menciona en el factor geológico, la alcalinidad y dureza son típicas de estas aguas de origen kárstico, debido a las condiciones de interacción por las capas geológicas cálcico-carbonatadas de la serranía Aguarague, de donde se asumen por condiciones de pendiente y rasgos morfométricos drenan las aguas subterráneas.

También se debe mencionar que, según interpretación de estos rasgos geológicos y geomorfológicos, se entiende que este espacio está asentado sobre un lecho con alta conductividad hidráulica, formado por un valle no muy pronunciado entre la serranía terciaria de la vecina República Argentina y la Serranía del Aguarague en nuestro país.

Tras lo mencionado se debe describir el siguiente detalle que describe la tipología de aguas identificadas.

ESTACIÓN	PERIODO 1-20	PERIODO 2-20	PERIODO 1-21
Pozo N° 4	Ca-Mg	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo N° 2	Ca-Mg	Ca-Mg-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo ENFE	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-Na-SO4
Pozo N° 9	Mg-Ca	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo N° 7	Mg-Ca-Na-SO4	Mg-Ca-Na-SO4	Mg-Ca-Na-SO4
Pozo N° 8	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo CARCAMO	Mg-Ca-Na-SO4	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-Na-SO4
Pozo TERMINAL	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo N° 5	Mg-Ca-SO4	Ca-Mg-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo YB-08	Ca-Mg-SO4	Ca-Mg-SO4	Mg-Ca-Na-SO4
Pozo YB-07	Ca-Mg-SO4	Ca-Mg-SO4	Mg-Ca-Na-SO4
Pozo YC-04	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-Na-SO4
Pozo YB-04	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo YC-03	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo YC-034	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo Bella Vista II	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo Bella Vista I	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo Valentina	Mg-Ca-Na-SO4	Ca-Mg-Na-SO4	Mg-Ca-SO4
Pozo N° 6	Ca-Mg-Na-SO4	Ca-Mg-SO4	Mg-Ca-Na-SO4
Pozo 15 de agosto	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-SO4	Mg-Ca-Na-SO4
Pozo San Juan	Mg-Ca-Na	Mg-Ca-Na-SO4	Mg-Ca-Na-SO4

Tabla N° 7. Masas de aguas identificadas

3.4. Acuíferos identificados en función del pH

Debido a las variaciones en cuanto a las concentraciones de los distintos elementos en disolución de las aguas subterráneas, pretendemos entender los diferentes mantos acuíferos desde el punto de análisis de “pH”, ya que este tiene una relación directa con cada uno de los cationes y aniones que se representa en la muestra, por tanto, a continuación, se describe el análisis realizado en función al pH medio de los tres periodos analizados. El pH juega un papel importante en muchos procesos biogeoquímicos de las aguas subterráneas naturales (equilibrio carbonatico, procesos redox, etc..). Además de ello se descarga para este análisis los componentes minoritarios, los cuales representan menos del 1% del contenido iónico total, por tanto, descartamos la utilización de los siguientes elementos, Fe+2, F-, K+, Sr+2, etc.

Por otra parte, en el presente análisis y en función a la complejidad de este tipo de investigaciones, descartamos la utilización de elementos traza, los cuales se encuentran en concentraciones menores a 0,0001 mg/l, cabe señalar que los dos únicos elementos traza encontrados en los análisis fueron Cromo Hexavalente y Cobre.

En cuanto a la concentración de gases, estos no fueron considerados en esta investigación, ya que los mismos no fueron registrados ni calculados en los análisis realizados por la empresa municipal de agua potable de la ciudad de Yacuiba.

La presencia de las especies mayoritarias o fundamentales como los aniones; cloruro, sulfato, bicarbonato, entre otros y los cationes como el Sodio, Calcio, Magnesio, Carbonato, Potasio sirvieron para el análisis de individual de las fuentes de agua, las mismas fueron analizadas desde el punto de vista de la metodología STIFF y Diagrama RADIAL.

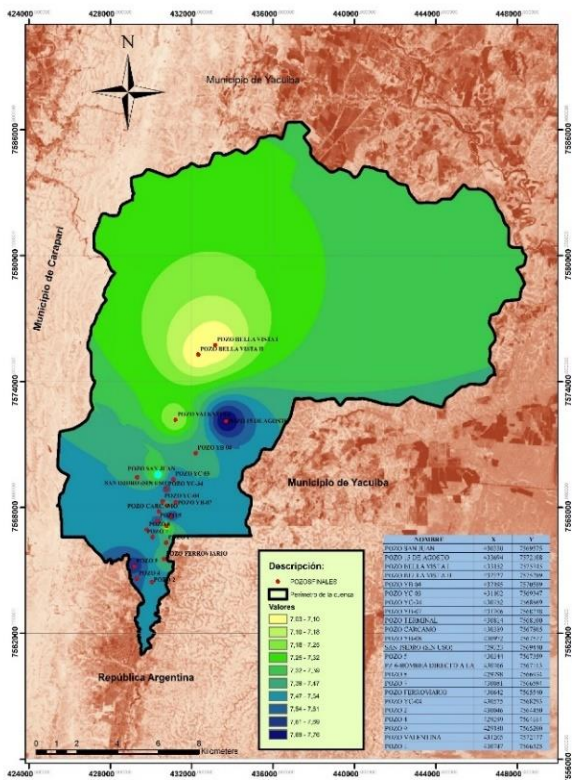


Figura N° 10. Identificación de mantos acuíferos

Los rangos de pH analizados están comprendidos entre los 7.03 como valor mínimo y 7.76 como valor máximo, siendo estos valores muy aceptables casi asimilados como valores neutros, dentro de la NB-512. Ver figura 10.

4. Conclusiones y recomendaciones

Podemos concluir los siguientes criterios.

4.1. Conclusiones:

- Con el presente trabajo se pudieron alcanzar los objetivos planteados, pudiendo identificar y describir las masas de agua de la zona de estudio.
- Si bien la calidad del agua de esta zona presenta características de dureza y alcalinidad, estas son aceptables, estando en rangos permisibles dentro de la NB-512, como también se
- Si bien se cuenta con información básica de análisis de parámetros mínimos y básicos, se imposibilitó conseguir más información como los niveles piezométricos de cada uno de los pozos, imposibilitando la determinación de las líneas de flujo de las aguas subterráneas.

- ⊙ Estando los pozos en la mancha urbana, se deben comprender otro tipo de análisis, sean estas probabilidades de vulnerabilidad a la contaminación de las masas de agua y de los acuíferos en sí, siendo un alto riesgo al cual está sometida la cuenca por las diferentes actividades antrópicas a las cuales se somete temporalmente.
- ⊙ Se debe mencionar que existe un alto riesgo de estrés hidrogeológico, esto debido a la creciente mancha urbana y distintos usos que se da a las fuentes de agua.
- ⊙ Si bien se contempla una metodología mediante el diagrama de Schoeller, para identificar la uniformidad de o dispersión de las muestras obtenidas, estas fueron comparados con los parámetros de la Norma Boliviana NB-512 y estas se encuentran dentro de los parámetros aceptables.
- ⊙ Si bien se hizo una identificación de acuíferos, estas fueron determinadas en función a las concentraciones de “pH” descartando las otras concentraciones minoritarias, esto también tomando en cuenta el tamaño de muestra cuenca en estudio.
- ⊙ Se recomienda profundizar los estudios e investigaciones referentes a esta temática, sosteniendo la idea primordial, que la ciudad de Yacuiba cuenta con esta fuente elemental para la subsistencia de los habitantes establecidos en esta ciudad.
- ⊙ Se recomienda realizar estudios de bombeo para determinar las características de agotamiento de los acuíferos, además de ello se debe tener en cuenta que mucho de estos pozos se encuentran a pocos metros de separación, produciendo un descenso drástico en su nivel dinámico.
- ⊙ También se debe entender que los procesos de recarga natural se ven afectados por la impermeabilidad de los suelos, tomando en cuenta que el caudal producido en esta zona escurre y no se somete a un proceso natural de infiltración, tomando en cuenta que la ciudad de Yacuiba esta sobre en un lecho detrítico que facilita los procesos de infiltración y recarga hídrica.
- ⊙ Es recomendable profundizar los análisis de parámetros básicos, tomando en cuenta la presencia de elementos traza como el Cobre, Cromo y seguimiento a la presencia de Arsénico, este elemento es muy típico en estas zonas y causa muchos daños a la salud humana.

4.2. Recomendación:

- ⊙ Se debe plantear una serie de estrategias para evitar la contaminación de acuíferos subsuperficiales, esto debido a las actividades desarrolladas en la zona.
- ⊙ El gobierno municipal y la subgobernanación de Yacuiba, debe profundizar el presente estudio, con la misión de identificar posibles zonas de aprovechamiento para la exploración de recursos hídricos, como también para su resguardo y evitar la contaminación del sistema acuífero de esta zona.
- ⊙ Proponer un control riguroso a los niveles piezométricos, con la visión de determinar el flujo hidrodinámico de los acuíferos.
- ⊙ Se recomienda realizar un estudio de meteorización de rocas carbonatadas de ambas serranías, con el objetivo de identificar la dureza de las aguas subterráneas, esto influenciado con la producción de enfermedades renales en la zonas y comunidades del municipio de Yacuiba.

5. Bibliografía

- 📄 Auge, M. (2007). Agua fuente de vida. Universidad de Buenos Aires., 31. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/AguaFuenteVida.pdf>
- 📄 Custodio Gimena Emilio, Llamas Mardurga Manuel Ramón, S. H. A. (2015). La investigación hidrogeológica Española en el contexto mundial. Custodio y Llamas, 32. <https://rac.es/ficheros/doc/00997.pdf>
- 📄 Gaspari, F. J. (2009). Estimación espacial, temporal y económica de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. Terra Latinoamericana, 27(1), 43-51.
- 📄 Viva, Q. (2012). Water, an essential resource. Instituto Centro de Estudios Transdisciplinarios Del Agu (CETA), 25. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>
- 📄 Herraiz, A. S. (2009). La importancia de las aguas subterráneas. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 103(1), 97-114.
- 📄 Robles Arenas, V. M. (2007). Caracterización hidrogeológica de la Sierra de Cartagena-La Unión (SE de la Península Ibérica). Impacto de la minería abandonada sobre el medio hídrico.
- 📄 Pino V, E., & Coarita A, F. (2018). Caracterización hidrogeológica para determinar el deterioro de la calidad del agua en el acuífero la yarada media. Revista de Investigaciones Altoandinas, 20(4), 477-490.
- 📄 Castro, L. (2010). Caracterización hidrogeológica del acuífero aluvial Naranjito, Quepos, Puntarenas. Revista Geológica de América Central, (42), 99-114.}
- 📄 Malhotra, N. K., & Benassini, M. (2008). Investigación de mercados (Vol. 5). México DF: Pearson educación.
- 📄 Valdiviezo, A. (Marzo de 2021). Iagua. Obtenido de Iagua: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-embalse>
- 📄 Villena, H. (Diciembre de 2004). CASO DE ESTUDIO UNESCO/OEA ISARM AMÉRICAS, SISTEMA ACUÍFERO YRENDATA-TOBA-TARIJEÑO. Obtenido de CASO DE ESTUDIO UNESCO/OEA ISARM AMÉRICAS, SISTEMA ACUÍFERO-YRENDATA-TOBA-TARIJEÑO.: https://www.oas.org/DSD/isarm/Documents/Spanish/informe_final_SAYTT_BOLIVIA.pdf
- 📄 YPFB (2016), Descripción de rasgos geológicos y geomorfológicos. <http://www.ypfbtransierra.com.bo/es/pdf/eeia/geologia.PDF>