

MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN EL VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA-BOLIVIA HYDROGEOLOGICAL MODELING IN THE CENTRAL VALLEY OF COCHABAMBA-BOLIVIA

Brayan López¹, Laura Rosales¹, Oliver Saavedra^{1,2}

¹ Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)

² Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Universidad Privada Boliviana

oliversaavedra@upb.edu

(Recibido el 05 de junio 2023, aceptado para publicación el 18 de julio 2023)

RESUMEN

En la región metropolitana de Cochabamba se ha observado un crecimiento acelerado de la mancha urbana, hacia las zonas de recarga acuífera y un incremento en el estrés hídrico de las aguas subterráneas, siendo el consumo de estas aproximadamente un 65% del consumo total de agua. Por esta razón, se ha visto la necesidad de realizar un estudio hidrogeológico en un sector de abanicos aluviales con acuíferos extensos y productivos, en el Valle Central de Cochabamba. En este sentido se propuso una red de monitoreo de niveles freáticos de pozos de abastecimiento de agua potable y riego en los Municipios de Tiquipaya y Colcapirhua, donde se realizaron 26 mediciones en un periodo de 6 meses entre abril y septiembre de 2021. Se ha configurado un modelo hidrogeológico simplificado en régimen estacionario, para comprender el comportamiento de los acuíferos en la zona, utilizando el software Visual MODFLOW Flex, considerando cuatro estratos: dos de arenas, gravas o bloques y dos de limos y arcillas con sus respectivas conductividades. Posteriormente, se realizó la calibración de los parámetros resultando en una correlación de 0.94, un RMS (Raíz Media Cuadrática) de 17 m y un RMS Normalizado de 16%. En la validación se obtuvo una correlación de 0.63 y un RMS normalizado de 78%. La tendencia de la dirección de flujo subterráneo principal es de norte a sur. Durante el periodo de monitoreo, se observó un descenso del nivel freático considerable, especialmente en los pozos OG-5 y OG-7. En los pozos OG-18 y OG-10, ubicados al noroeste con niveles profundos y al centro con niveles superficiales, respectivamente, los niveles freáticos subieron de 3 a 5 metros desde 2019, evidenciando una recarga correspondiente a los abanicos aluviales, principalmente del río Chijlawiri. Por ello, es crucial realizar monitoreos periódicos de los niveles freáticos, al igual de caracterizar la calidad de las aguas subterráneas en la zona.

Palabras Clave: Aguas Subterráneas, Cochabamba, Valle Central, Modelo Hidrogeológico.

ABSTRACT

In the metropolitan region of Cochabamba, an accelerated growth of the urban footprint has been observed, towards the aquifer recharge areas leading to an increase in the groundwater stress, with groundwater consumption being approximately 65% of total water consumption. Then, there is a need for a hydrogeological study in a sector of alluvial fans with extensive and productive aquifers, in the Central Valley of Cochabamba. In this sense a monitoring network was established to measure phreatic levels in drinking water supply and irrigation wells in the Municipalities of Tiquipaya and Colcapirhua, where 26 measurements were made in a period of 6 months between April and September 2021. A simplified hydrogeological model was set up in steady-state condition, to understand the behavior of the aquifers in the area, using Visual MODFLOW Flex, considering four layers: two of sand, gravel or blocks and two of silt and clays, each with their respective conductivities. Subsequently, Calibration of parameters was performed resulting in a Correlation of 0.94, an RMS (Root Mean Square) of 17 m and a Normalized RMS of 16%. In the Validation, a Correlation of 0.63 and a Normalized RMS of 78% were obtained. The trend of the main groundwater flow direction is from north to south. Significant decreases in water levels were observed during the monitoring period, particularly in wells OG-5 and OG-7. In wells OG-18 and OG-10, located in the northwest with deep levels and in the central area with shallow ones, respectively, the water table has risen by 3 to 5 meters since 2019, evidencing a recharge corresponding to alluvial fans, mainly from the Chijlawiri river. Therefore, it is crucial to carry out periodic monitoring of phreatic levels, as well as to characterize the quality of groundwater in the area.

Keywords: Groundwater, Cochabamba, Central Valley, Hydrogeological Model.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la última mitad del siglo XX, la población urbana mundial ha ido en crecimiento debido al incremento de la natalidad sobrepasando a la población rural, llegando a 56% para 2021 y se estima que será un 68% para 2050 [1]. En la región metropolitana de Cochabamba, la cual ha crecido un 150% en las últimas dos décadas [2] debido a un crecimiento acelerado, la población actual es aproximadamente 1.5 millones de habitantes [3].

Tal crecimiento acelerado en la población refleja una mayor tensión en los recursos hídricos, especialmente en zonas semiáridas [4], produciendo una extracción insostenible de agua dulce de ríos, acuíferos y embalses para consumo humano [5], lo cual altera el ciclo hidrológico del agua, incrementa la contaminación de las fuentes de agua y reduce las zonas de infiltración natural, tal como ocurre en el Valle Central de Cochabamba [6], donde se estima que para 2036, la mancha urbana llegará a cubrir un 65% de la zona acuífera [2].

Por otra parte, la cantidad de agua dulce disponible en el mundo equivale solamente a un 2.5% del total [7] y las aguas subterráneas representan el 99% del agua dulce en estado líquido en la tierra [5]; por ende, este recurso es clave para el sustento del bienestar humano, desarrollo socioeconómico y medioambiental [8], destacando sus distintos usos en abastecimiento de agua potable, agricultura, industria, minería, recreación, entre otros [4]. Por ejemplo, en Valle Central de Cochabamba, las aguas subterráneas representan la principal fuente de abastecimiento con un 65% aproximadamente y el resto de aguas superficiales [9].

En el último siglo, la extracción de aguas subterráneas ha incrementado, reduciendo rápidamente el almacenamiento de aguas subterráneas [10] en consecuencia al auge en la construcción de pozos de agua con nuevas tecnologías de perforación y bombeo [8], que permitieron explorar cada vez acuíferos más profundos y extracción de grandes caudales de agua [11]. Asimismo, la calidad se ha visto afectada por factores contaminantes antropogénicos [11]. Estos factores se incrementarán, en vista que la dependencia de las aguas subterráneas no hará más que aumentar a futuro [5]. Actualmente, se desconoce la cantidad de pozos existentes en la región metropolitana de Cochabamba. Según SEMAPA (Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario), en 2012 existían alrededor de 1400 pozos en esta región [12], sin embargo, a la fecha, SIASBO (Sistema de Información de Aguas Subterráneas de Bolivia) sólo cuenta con el registro de aproximadamente 900 pozos [13].

Las aguas subterráneas se constituyen en fuentes de agua necesarias para lograr las metas del Objetivo 6 de la Agenda del Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, es decir, agua limpia y saneamiento para todos [8], por lo que es imprescindible comprender las características locales de los recursos de aguas subterráneas, en vista de su heterogeneidad, recopilar datos de los acuíferos y pozos, intensificar la investigación para desarrollar capacidades de análisis hidrogeológico que proporcionen bases para estudios y mejorar la gestión de las aguas subterráneas [14], en zonas de gran estrés hídrico como lo son los municipios del Valle Central de Cochabamba.

El Plan Director de la Cuenca del Río Rocha, surgió como una herramienta de gestión de agua [6], donde, a través de la Plataforma Interinstitucional de la Cuenca del Río Rocha (PICRR) en la Comisión de Aguas Subterráneas realizada por el Servicio Departamental de Cuencas (SDC), se llevó a cabo un evento para el intercambio de experiencias entre la Gobernación de Cochabamba y diversas instituciones sobre estudios hidrogeológicos previos en Quillacollo y Vinto [15]. En otros municipios se ha recolectado información de diversas instituciones de los pozos existentes, tales como nivel freático, parámetros fisicoquímicos y se acordó realizar una gestión de este recurso [16]. En cambio, en los Municipios de Colcapirhua y Tiquipaya, no se cuenta con información detallada sobre las aguas subterráneas. Los pozos son gestionados por OLPES (Operadores Locales de Pequeña Escala) y/o por los mismos comunarios, donde no se cuenta información o no se realiza inventario y mantenimiento de los pozos, tratamiento y/o desinfección de aguas, ni monitoreo de la extracción ni de la fluctuación de los niveles freáticos [9].

Con el desarrollo de investigaciones en hidrogeología, es importante entender el desarrollo de modelos conceptuales y soluciones analíticas o métodos de modelación numérica de aguas subterráneas [17]. Un modelo hidrogeológico es una representación simplificada del sistema hidrogeológico el cual se construye a través de un modelo conceptual y se convierte a un modelo numérico matemático utilizando un software [18]. Visual MODFLOW es una interfaz gráfica de usuario para USGS MODFLOW, comúnmente usado para modelos de flujo de aguas subterráneas y transporte de contaminantes, el cual facilita un proceso de configuración rápida y acelera la interpretación de resultados a través de mapas de contorno y tablas; su versión clásica tiene un enfoque numérico y la versión Flex uno conceptual [19]. MODFLOW se ha utilizado notablemente en el Medio Oriente y en países asiáticos [19], como en la India, para modelos en régimen estacionario [20] o en modelos de transporte de contaminantes [21], o en China, para estudios de riego y agua potable [22], en la que MODFLOW se integra con otras aplicaciones, como GIS, SWAP, SWAT [19], hasta modelos de aguas subterráneas con enfoque a la gestión [23]. En Bolivia se ha utilizado Visual MODFLOW para estudios realizados en Valle Alto [24] y Visual MODFLOW Flex en Valle Central en Quillacollo [25] y Vinto [26].

En este estudio se propone una red de monitoreo de niveles freáticos y la configuración de un modelo hidrogeológico en un sector productivo del Valle Central de Cochabamba utilizando Visual MODFLOW Flex. El objetivo principal es representar el sistema hidrogeológico de la zona de forma simplificada de manera que permita comprender el estado actual y el comportamiento de los acuíferos en la zona.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende los Municipios de Tiquipaya y Colcapirhua, la cual limita al norte por la cordillera Tunari, y al sur por las serranías de Santivañez y Anzaldo, al este por el Municipio de Quillacollo y al oeste por el Municipio de Cercado. Forma parte de la región del Valle Central de Cochabamba en la Cuenca del río Rocha.

La extensión del área de estudio es de aproximadamente 60 km², con una elevación entre 2840 a 2550 m.s.n.m. (determinado en base a Modelo Digital de Terreno (DEM) modificado [27]). Se observa en la Figura 1, los ríos principales que lo atraviesan, los cuales son (en orden de este a oeste): el río Taquiña, la torrentera Chutakawa, la torrentera Khora, el río Tolavi, el río Pihusi y el río Chijllawiri.

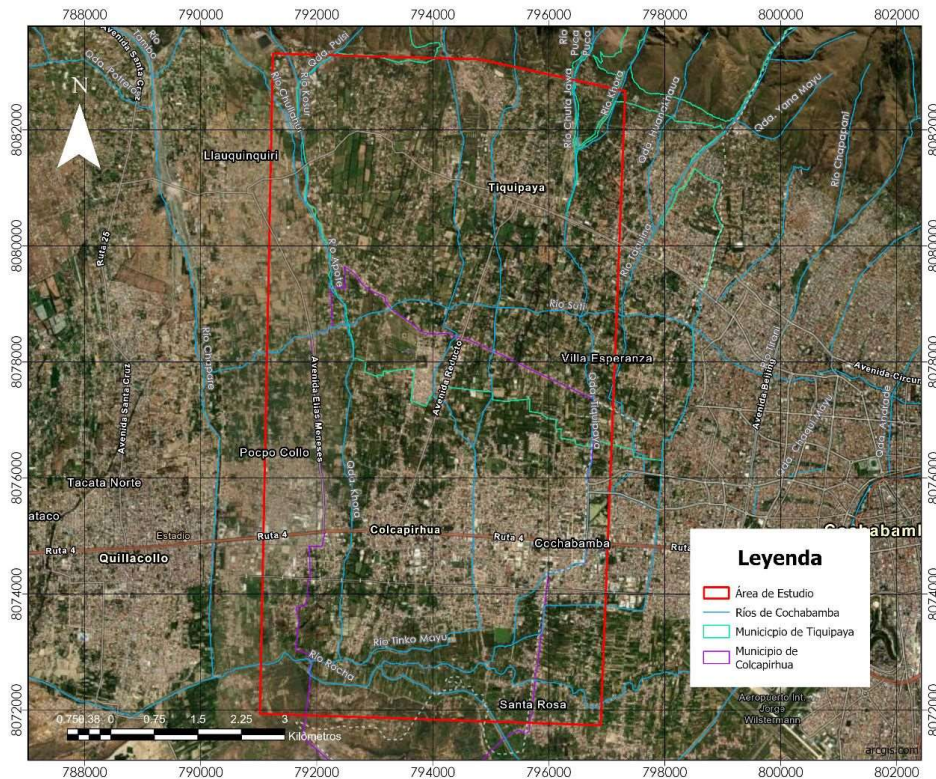


Figura 1: Mapa de Ubicación de la Zona de Estudio.

Fuente: Elaboración propia.

▪ Tiquipaya

La zona de estudio abarca los Distritos que se encuentran en el Valle, donde se presenta una urbanización desacelerada y sin planificación [28]. Se encuentra en un sector de llanuras aluviales con pendientes promedio del 8%, con abanicos y conos aluviales del cuaternario a nivel de piedemonte [29].

▪ Colcapirhua

En cambio, en el Municipio de Colcapirhua, el 68% de su extensión comprende áreas rurales, de cultivo intensivo, tanto en agropecuaria como en floricultura [30]. Se encuentra en una zona de valles meso térmicos, en un flanco del macizo montañoso central, con un clima característico de valle (semiárido) y con paisajes de montañas estructurales, piedemonte y llanuras fluvio-lacustres. Los suelos están formados por sedimentos coluvio-aluviales del cuaternario en la llanura (con limos y arcillas de buenas características fisicoquímicas) y por limolitas y areniscas grises a verdosas del Ordovícico en la Cordillera del Tunari. Tienen buen potencial para las aguas subterráneas [31].

3. METODOLOGÍA

La secuencia metodológica para cumplir con los objetivos del estudio se describe en la Figura 2. La información secundaria corresponde a una recopilación de información de fuentes y estudios previos como referencia, y la información primaria, corresponde al inventario y monitoreo de los niveles piezométricos que se utilizaron para la modelación.

Con base a esta recopilación, se procedió a conceptualizar el sistema hidrogeológico de forma básica y simplificada, en vista de la gran extensión de la zona de estudio. El modelo conceptual y numérico fue configurado en “Visual MODFLOW Flex”.

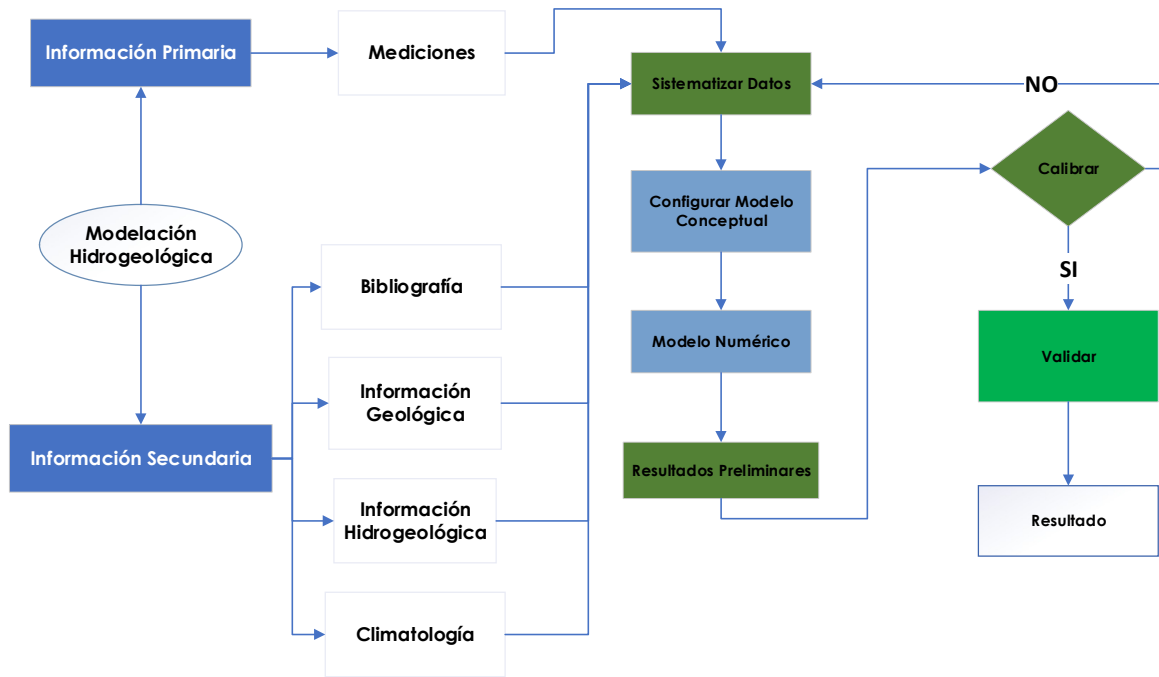


Figura 2: Flujograma de procesos para la configuración del modelo hidrogeológico.
Fuente: Elaboración propia.

Para el desarrollo de un modelo conceptual, se puede seguir en la Tabla 1.

TABLA 1 - COMPONENTES DEL MODELO CONCEPTUAL

I. Datos geológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Antecedentes históricos • Exploración in situ • Estudio cartográfico • Descripción geológica
II. Datos climáticos	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación • Infiltración • Evapotranspiración • Recarga y salida
III. Datos hidrogeológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de flujo • Capas estratigráficas • Tipos de acuíferos • Caudal

Fuente: Elaboración propia.

3.1. Datos Climatológicos

La zona de estudio se caracteriza por tener un clima templado y semiárido, sin cambios bruscos durante el año, siendo los veranos donde se produce la precipitación, los otoños son semisecos, invierno y primavera secos. Debido a la diferencia de alturas existentes en el valle con respecto a la cordillera, en las partes bajas la temperatura aumenta y en altas disminuye, siendo opuesto para la precipitación [32].

▪ Precipitación

Las precipitaciones ocurren normalmente entre los meses de noviembre hasta abril, siendo enero el mes de mayor intensidad, pero de corta duración. En cambio, los meses más secos son de mayo a julio. Las lluvias que se producen en el valle central no son uniformes, es decir, ocurren como chubascos locales y además varía con la altura (a mayor altura, mayor precipitación) [32].

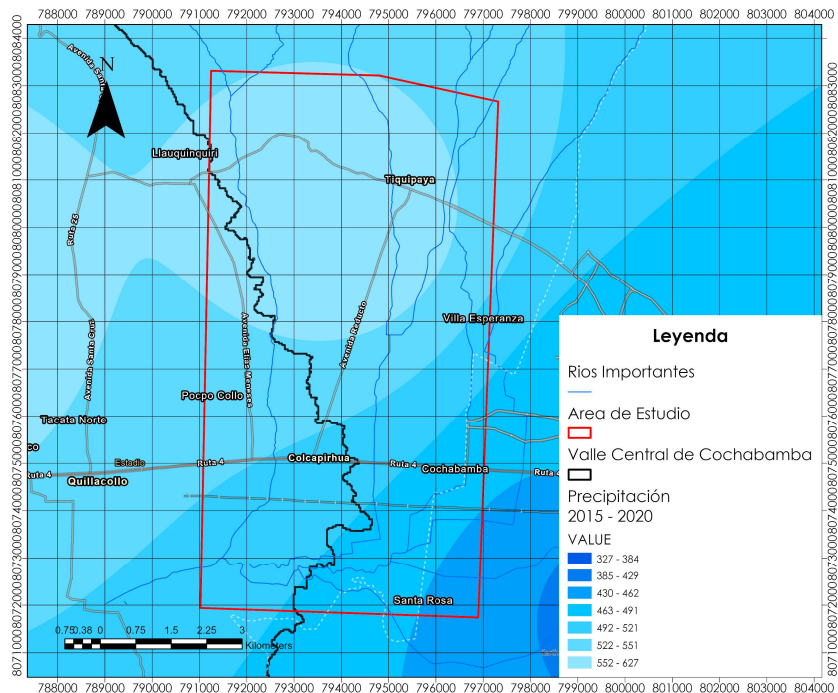


Figura 3: Precipitación media anual de la zona de estudio, 2015-2020.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

En la Figura 3, se observa una interpolación realizada de la precipitación media anual distribuida en la zona, entre los años 2015 – 2020 y utilizando datos de SENAMHI, donde un rango aproximado es de 600 a 400 mm.

▪ Temperatura

La temperatura media anual en el Valle Central de Cochabamba es aproximadamente 17.5 °C, al igual que la precipitación, esta varía con la altura (a mayor altura menor temperatura). Las temperaturas más extremas se observan en los meses de octubre a febrero (en verano) y las temperaturas mínimas, en invierno, entre los meses de mayo a julio [32]. Este comportamiento característico se refleja en la zona de estudio, donde la temperatura media es 27.3°C, la mínima es 6°C en invierno y la máxima es 30.9°C (ver TABLA 2).

▪ Evapotranspiración

Se estima que en el Valle Central de Cochabamba, la evapotranspiración potencial (ETP) es de aproximadamente 1400 mm/año, y la evapotranspiración real (ETR) es de 490 mm/año [32].

TABLA 2 - VARIACIÓN DE TEMPERATURA, COLCAPIRHUA

Parámetro	Temperatura
Temperatura media	16,9 °C
Temperatura máxima media	27 °C
temperatura mínima media	6 °C
Máxima absoluta	30,9 °C
Mínima absoluta	6 °C

Fuente: [31].

3.2. Geología e Hidrogeología de la Zona

▪ Geología

La zona de estudio (ver Figura 4) se encuentra a los pies de la cordillera Tunari, en la llanura aluvial del valle, por tanto, está representado en su totalidad por sedimentos del cuaternario con materiales lacustres y fluvio-lacustres [32]. En la parte inferior de la cordillera se encuentran los depósitos de piedemonte, conformados por materiales heterogéneos tales como clastos, rocas, gravas, arenas, formando un área de depósito de abanicos aluviales. En la región media se presentan los depósitos de terraza y más al sur los depósitos fluvio-lacustres. En los ríos se destacan los depósitos aluviales que permiten gran infiltración de caudal a los acuíferos, especialmente en el río Chijlawiri [25] (río al oeste de la zona). Los sedimentos en general se vuelven más finos hacia el sur, tales como limos y arcillas, formando acuíferos confinados hacia el río Rocha en una región fluvio-lacustre.

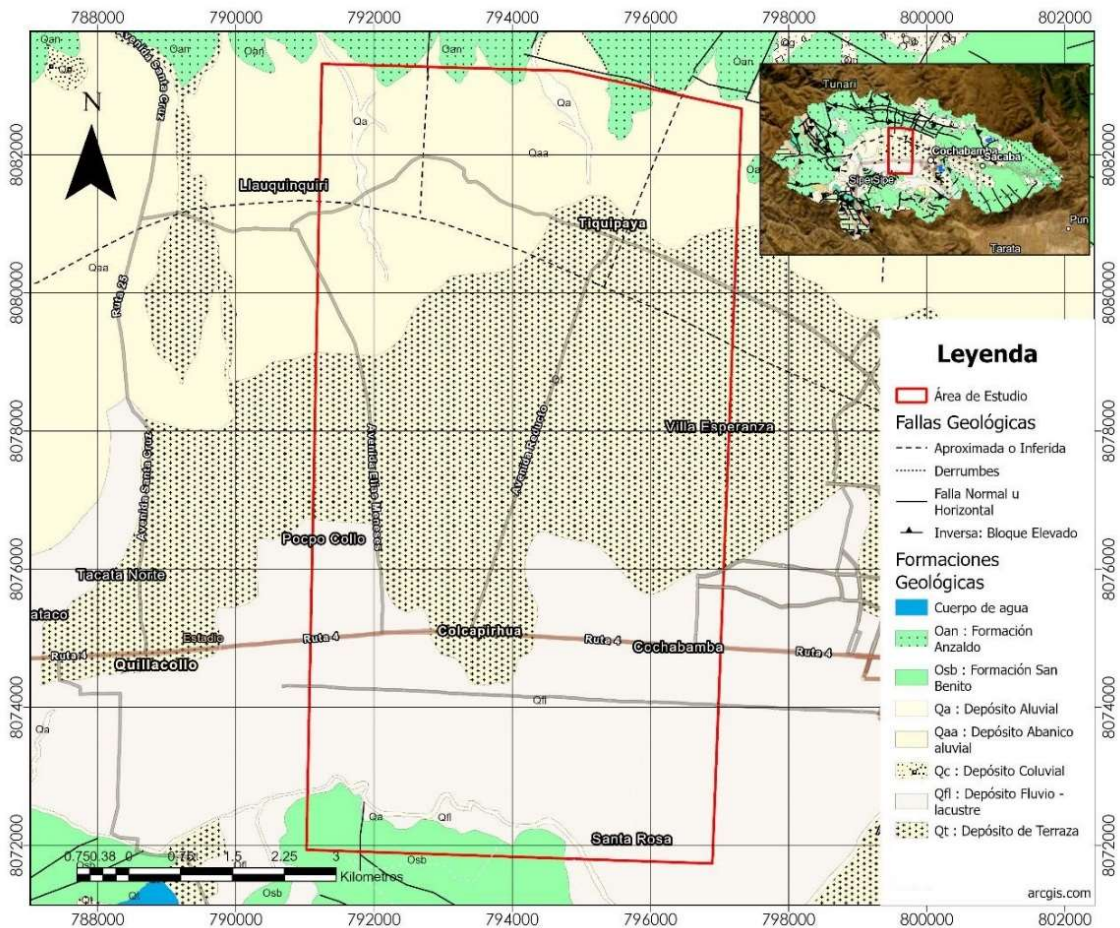


Figura 4: Mapa geológico de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración Propia en base a [29]

▪ **Fisiografía y Geomorfología**

Se observa que en la zona se caracteriza por estar presente en valles meso térmicos, en un flanco macizo montañoso central, donde se observan paisajes de montañas estructurales, piedemonte y llanuras fluvio-lacustres, con ligeras depresiones y serranías ubicadas al sur del Municipio de Colcapirhua [31], ver TABLA 3.

TABLA 3 - FISIOGRAFÍA

Gran Paisaje	Paisaje	m.s.n.m.	Textura
Montañas estructural-denudativas	Colinas de formación San Benito	2550	Media
		2736	Gruesa
Pie de monte de la Serranía de Tiquipaya	Abanico antiguo	2560	Media
		1570	Moderadamente fina
	Abanico subcreciente	2570	Media
		2700	Moderadamente fina gruesa piedras redondas
Llanura fluvio lacustre	Terraza reciente	2545	Media
		2560	Moderadamente gruesa
	Terraza subcreciente		Moderadamente fina a fina

Fuente: [31]

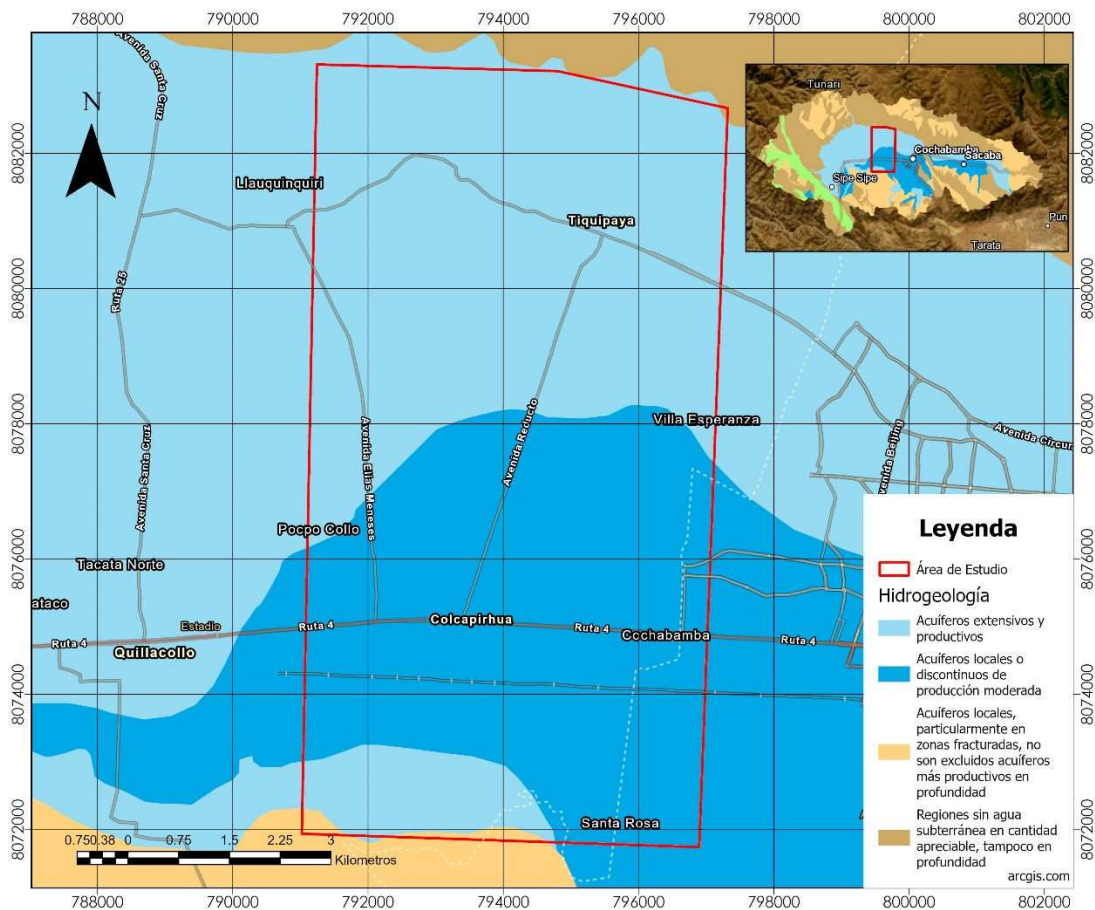


Figura 5: Mapa hidrogeológico de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración Propia en base a [29].

Con respecto a la geomorfología, la zona está limitada al norte y al sur por la zona montañosa sujeta a procesos de erosión, glaciación y cambios de temperatura y gran precipitación. A los pies de la cordillera se encuentra una zona de talud y piedemonte, donde los abanicos aluviales se interconectan y forman la llanura aluvial. Los abanicos más antiguos se encuentran al norte y los más recientes, hacia el río Rocha. En la parte central de la cuenca de Cochabamba, se encuentra la zona de la llanura con los depósitos fluviolacustres y predominantes los materiales finos [32].

▪ Hidrogeología

La hidrogeología de la zona de estudio (ver Figura 5) se caracteriza por ser del grupo de “Rocas porosas no consolidadas”, con presencia de abanicos aluviales a los pies de la cordillera del Tunari con sedimentos gruesos heterogéneos [32], estos pertenecen a los “Abanicos aluviales y Terrazas en ríos de pendientes bajas” al norte (Tiquipaya), con bloques, cantos, gravas, arenas y limos; y al sur (Colcapirhua) con “Acuíferos Locales o discontinuos de Producción moderada”, destacándose materiales fluviolacustres con gravas, arenas, limos y arcillas.

La principal recarga de agua subterránea a la zona proviene de los ríos. Estos se caracterizan por ser dendríticos con tendencia a centrípeta a la cuenca del río Rocha, con cauces de ríos irregulares que generan grandes volúmenes de sedimentos en época de lluvias [32]. La mayoría de los ríos son intermitentes de caudales bajos, sin embargo, se ha observado que el río Chijllawiri, presenta constantemente caudales producto de excedentes de la central hidroeléctrica de Misicuni [25], favoreciendo con un gran aporte a los acuíferos de la zona.

3.3. Campañas de Medición de Nivel Freático

Se realizaron campañas de mediciones en la extensión del área de estudio, en un periodo de 6 meses durante el año 2021, ver TABLA 4, entre los meses de abril hasta septiembre. Estas mediciones cuentan con el nombre de código “ID” enumerado del 1 al 26, las cuales corresponden a 26 mediciones realizadas, para lo cual se utilizó una sonda de nivel. Sin embargo, algunos de estos pozos se han medido más de una vez, por esto se creó el código “M-ID”, el cual corresponde al código de los pozos.

TABLA 4 - CAMPAÑA DE MEDICIONES DURANTE 2021

M-ID	ID	Nombre del Pozo	Mes	UTM X	UTM Y	Medición (m)	Boca de Pozo (m)
OG-1	PM-1	Perrera_Frente_UPB	Abril	795739	8074040	3.82	0.32
OG-2	PM-2	POZO2TANQUEELEV.OTBCBBA	Abril	795326	8073600.3	2	0.19
OG-2	PM-3	POZO2TANQUEELEV.OTBCBBA	Mayo	795324	8073625.2	2.7	0.22
OG-3	PM-4	POZOHIDROP.LIRIOS	Mayo	795141	8073906	15	0.29
OG-4	PM-5	POZO2HIDROP.OTBSUM.CHICO	Junio	794792	8073864.2	27.43	0.37
OG-5	PM-6	POZO1TANQUEELEV.1OTBS.LORENZO	Junio	793507	8074532.5	5.5	0.45
OG-6	PM-7	POZO1TORREHI.OTBPIÑAMISUD	Junio	792125	8074831	7.8	0.15
OG-7	PM-8	POZO1TANQUEELEV.OTBSETON	Junio	796506	8074771	7.27	0.32
OG-8	PM-9	POZOTANQUEELEVOTBHOLANDA-N30m	Junio	795820	8075191.3	15.5	0.53
OG-9	PM-10	POZOParquedelaConcordia	Julio	795109	8076238.3	19.48	0.04
OG-10	PM-11	POZO1ColegioNuestraSeñoradeLaPaz	Agosto	793661	8077763.4	0.5	0.24
OG-11	PM-12	POZOCasaCercaUSaleciana	Agosto	793739	8078362.2	0.66	0.5
OG-12	PM-13	PozoUSaleciana	Agosto	793593	8078185.8	0.91	0.1
OG-13	PM-14	POZO1HIDROPOTB4ESQUINAS	Agosto	794906	8078410.8	0.09	0.12
OG-14	PM-15	POZO3HIDROPOTB4ESQUINAS	Agosto	794733	8079036.5	0	0.33
OG-15	PM-16	POZONUEVOOTB4ESQUINAS	Agosto	794528	8079097.8	0	0.24
OG-16	PM-17	POZO1TANQUEOTBCOLLA	Agosto	792896	8077804.2	0.18	0.28
OG-17	PM-18	Pozo2ColegioNuestraSeñoradeLaPaz	Agosto	793556	8077845.1	0	0.11
OG-18	PM-19	PozoPlazadeApote	Septiembre	793121	8081884.5	29	0.7
OG-2	PM-20	POZO2TANQUEELEV.OTBCBBA	Septiembre	795315	8073604.5	2.33	0.19
OG-4	PM-21	POZO2HIDROP.OTBSUM.CHICO	Septiembre	794798	8073860.2	31	0.37
OG-5	PM-22	POZO1TANQUEELEV.1OTBS.LORENZO	Septiembre	793505	8074538.8	14.85	0.45

M-ID	ID	Nombre del Pozo	Mes	UTM X	UTM Y	Medición (m)	Boca de Pozo (m)
OG-19	PM-23	POZO3TORREH.OTBSANLORENZO	Septiembre	793486	8074434	6.1	0.25
OG-20	PM-24	POZO2TANQUEELEV.2OTBSANLORENZO	Septiembre	793445	8074461.5	14.61	0.3
OG-6	PM-25	POZO1TORREHI.OTBPIÑAMISUD	Septiembre	792125	8074831	9.21	0.15
OG-7	PM-26	POZO1TANQUEELEV.OTBSETON	Septiembre	796496	8074774.9	24.1	0.32

Fuente: Elaboración propia.

Al momento de realizar la medición del nivel freático de pozos al norte del Municipio de Colcapirhua (mitad oeste y central de la zona), se observó que los niveles son muy pequeños, como en los pozos PM-11 al PM-18 (ver TABLA 4), que se encuentran cerca o incluso sobre el nivel del terreno. Algunos de estos pozos se han identificado como surgentes. El pozo medido con el nivel más profundo fue el PM-21, con 31 metros.

En la Figura 6, se observa la ubicación de los pozos medidos durante las campañas de monitoreo, utilizando el código OG de la TABLA 4. Dado que el modelo hidrogeológico es en régimen estacionario, los niveles medidos fueron los estáticos.

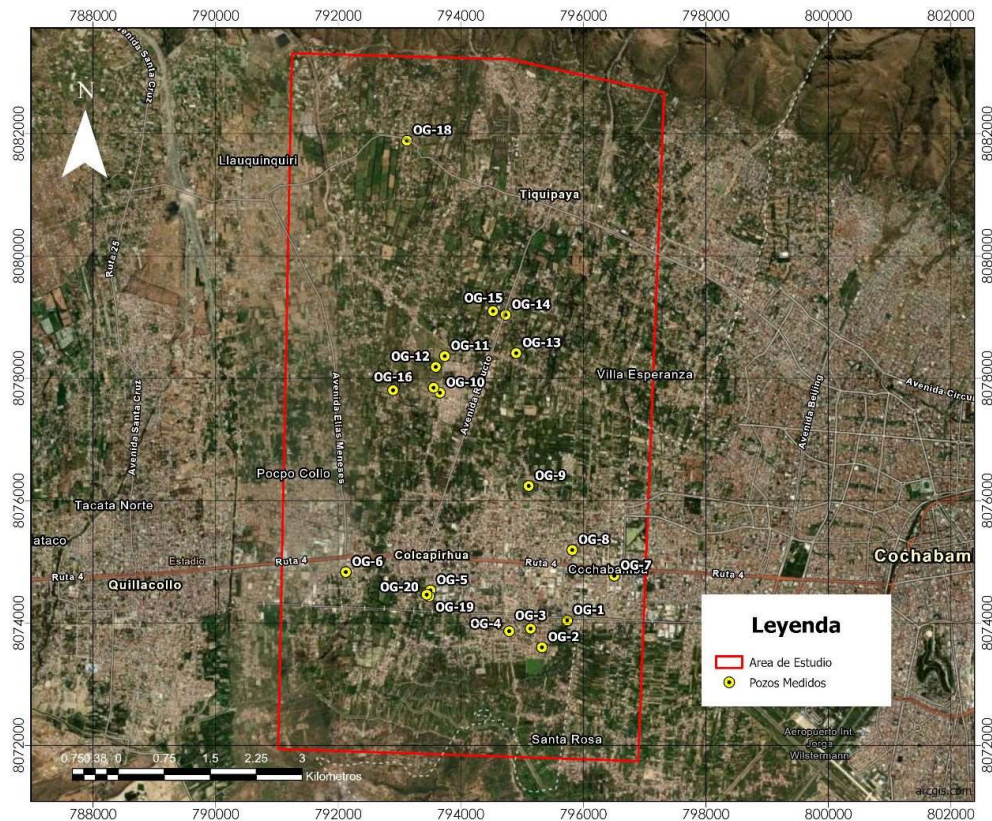


Figura 6: Ubicación de todos los pozos medidos en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Configuración del Modelo Hidrogeológico

Para el desarrollo del Modelo Conceptual, se ha optado por utilizar Visual MODFLOW Flex por su interfaz de usuario. El modelo numérico está definido por los datos que se importa (superficies, polilíneas, polígonos, otros), las condiciones de borde y la grilla definida [33].

3.4.1. Datos necesarios para importar al modelo

Los datos utilizados para importar al modelo son:

- Área de Estudio, esta debe ser un polígono en formato shapefile, exportado por herramientas GIS, en este caso se usó ArcGIS Pro, tomando como base el límite político de los municipios.
- Topografía de la zona de estudio, este archivo se obtuvo a través de un DEM de uso libre (ALOS PALSAR), el cual debe ser corregido y convertido a un archivo tipo punto para posteriormente generar la topografía en formato GRD.
- Capas estratigráficas, estas se configuraron con base a estudios previos [25] y al esquema geológico de la cuenca de Cochabamba propuesto por el PIRH (Proyecto Integrado de Recursos Hídricos de Cochabamba), el cual proporciona una idea general de los estratos [32]. Se utilizó la herramienta Surfer con el método Kriging, para interpolar estas superficies, obteniéndose cuatro capas.
- Para definir las conductividades hidráulicas se determinaron rangos de los estratos a partir del propuesto por Todd [34]

TABLA 5 - VALORES DE LA CONDUCTIVIDAD SEGÚN SU TENDENCIA

Estratos	Rango de Conductividad (m/s)
Arenas, gravas o bloques	10^{-1} al 10^{-4}
Limos y arcillas	10^{-1} al 10^{-7}
Arenas, gravas o bloques	10^{-2} al 10^{-6}
Limos y arcillas	10^{-5} al 10^{-8}

Fuente. Elaboración Propia en base a [34].

- Ríos: obtenidos por medio del DEM corregido. Según el cauce natural, sus dimensiones son variables en toda la extensión de la zona, sin embargo, se tomaron dimensiones y altura de agua uniformes.
- Pozos: se procedió a obtener los niveles piezométricos en m.s.n.m. utilizando la Coordenada Z desplegada del DEM. Los pozos utilizados para la modelación se observan en la TABLA 4.
- Condiciones de borde: para este modelo se tomó en cuenta la evapotranspiración real, recarga y nivel de agua de los ríos (ver TABLA 6).

TABLA 6 - CONFIGURACIÓN DE LAS CONDICIONES DE BORDE

Evapotranspiración	Tasa mm/año: 520	Profundidad de raíces (m): 5.8	
Recarga	Tasa mm/año: 173.5	Profundidad de encharcamiento (m): 0.4	
Ríos	Espesor del lecho (m): 1.5	Ancho del río (m): 2.5	Conductividad del lecho m/s: 0.01

Fuente. Elaboración propia.

Una vez importadas los datos al software, se tiene el modelo conceptual como se observa en la Figura 7.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de calibración, validación, dirección de flujo y fluctuación de niveles en toda la zona de estudio. Para el proceso de calibración se utilizó el periodo de toma de muestras de los pozos entre los meses de agosto a septiembre y para la validación, los pozos del periodo de junio a julio. Con los niveles piezométricos se determinó la dirección de flujo subterráneo y la fluctuación de niveles en distintos periodos y años.

4.1 Calibración

El método utilizado para la calibración fue el “Ensayo de Prueba y Error”, este proceso se traduce como: el ajuste sistemático de los parámetros más sensibles del modelo con el fin de identificarlos e influir en ellos. A fin de estabilizar el modelo, se identificó que los dos parámetros más sensibles en el modelo son los niveles piezométricos que determinan la superficie freática, y la conductividad hidráulica de los estratos. Con base al modelo estabilizado y al rango de conductividades hidráulicas, se utilizaron las siguientes conductividades para la calibración final (ver

TABLA 7).

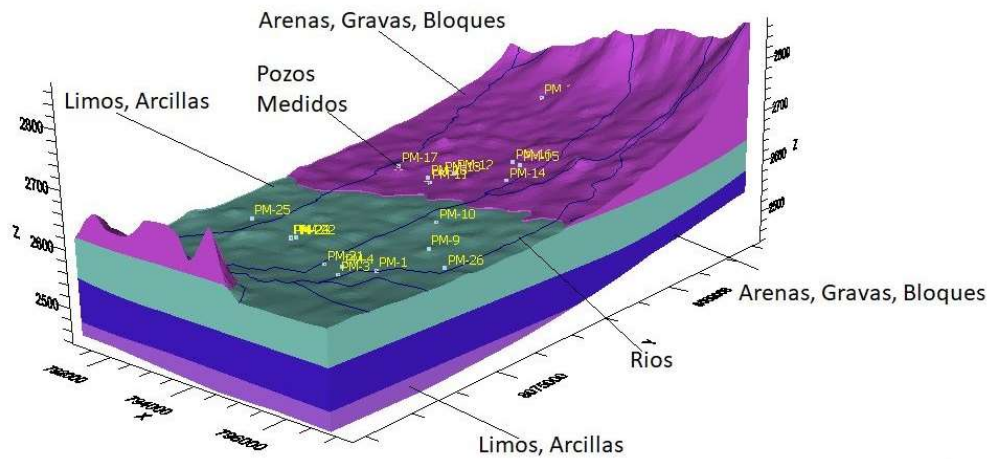


Figura 7: Modelo conceptual de la zona de estudio.

Fuente: Captura del modelo en VMODFlex.

TABLA 7 - CONFIGURACIÓN FINAL DE CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS

Zona de Estudio	Estrato	Conductividad (m/s)		
		Kx	Ky	Kz
Zona 1	Arenas, gravas o bloques	0.005	0.005	0.0005
Zona 2	Limos y arcillas	0.0001	0.0001	1E-05
Zona 3	Arenas, gravas o bloques	0.0005	0.0005	5E-05
Zona 4	Limos y arcillas	3.3E-09	3.3E-09	3.3E-10

Obteniendo la comparación de la Tabla 8 entre niveles piezométricos calculados vs observados.

TABLA 8 - RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MEDICIONES DE AGOSTO Y SEPTIEMBRE

ID	X	Y	Z (m.s.n.m.)	Calc. (m.s.n.m.)	Obs. (m.s.n.m.)	Calc.-Obs. (m.s.n.m.)
PM-11	793660.90	8077763.40	2622.54	2637.3	2622.3	15.064
PM-12	793739.20	8078362.20	2628.18	2643	2628	14.984
PM-13	793592.80	8078185.80	2627.00	2640.2	2626.2	13.968
PM-14	794905.50	8078410.80	2631.00	2633.7	2631	2.6958
PM-15	794732.60	8079036.50	2644.00	2649	2644.3	4.6319
PM-16	794528.40	8079097.80	2645.43	2651.4	2645.7	5.7606
PM-17	792896.00	8077804.20	2640.38	2636.1	2640.5	-4.3922
PM-18	793556.20	8077845.10	2628.00	2637.4	2628.1	9.2574
PM-19	793121.20	8081884.50	2697.99	2699.5	2669.7	29.818
PM-20	795315.10	8073604.50	2593.44	2597.7	2591.3	6.4356
PM-21	794797.80	8073860.20	2594.00	2598	2563.4	34.672
PM-22	793505.00	8074538.80	2597.00	2604.5	2582.6	21.93
PM-23	793485.80	8074434.00	2598.00	2602.9	2592.1	10.792
PM-24	793444.90	8074461.50	2597.65	2603	2583.3	19.636
PM-25	792125.00	8074831.00	2598.68	2606.6	2589.6	16.967
PM-26	796495.90	8074774.90	2597.04	2601.9	2573.3	28.677

Fuente: Elaboración propia.

Estos se representan mejor en un scatter-plot, como se observa en la Figura 8.

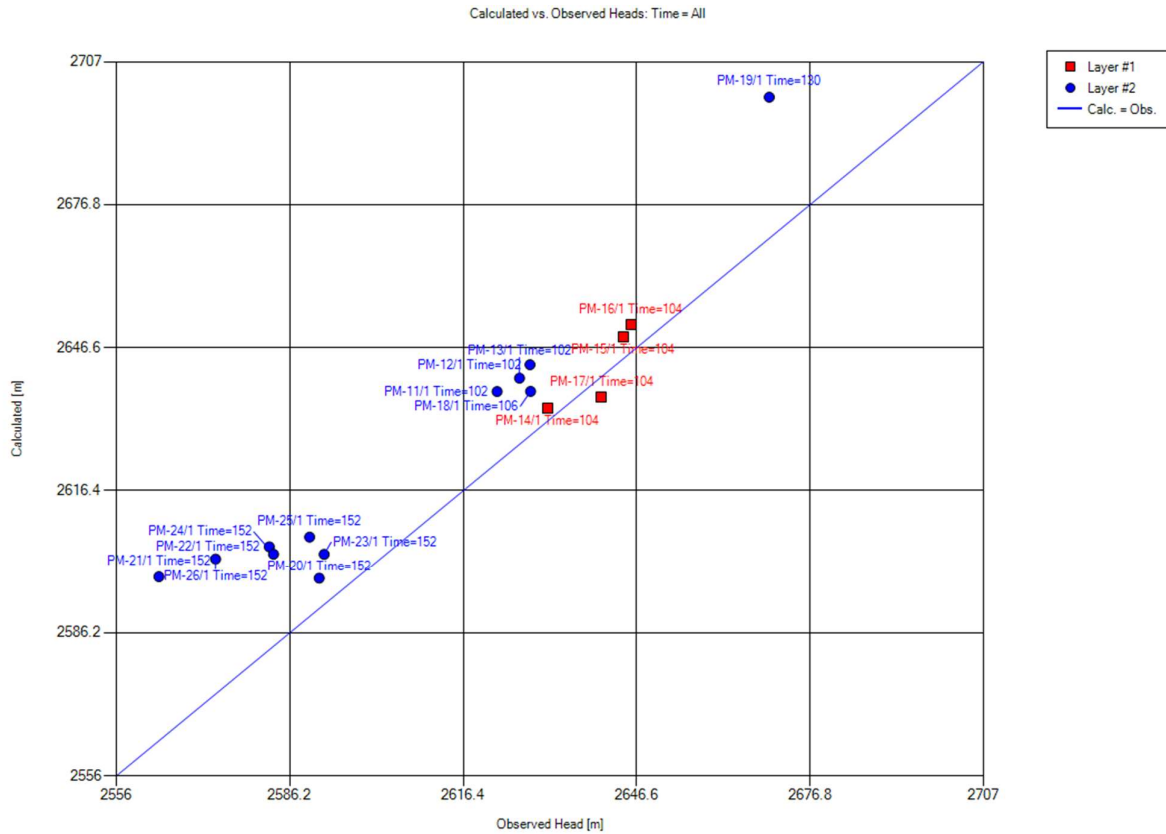


Figura 8: Scatter Plot de los niveles piezométricos calculados vs observados para la calibración final del modelo utilizando los pozos medidos de agosto a septiembre.

Fuente: Elaboración propia.

En la

TABLA 9 se puede observar los errores obtenidos en la calibración, destacando un coeficiente de correlación de 0.94, un RMS de 17.75 m. y un RMS normalizado de 16.69%.

TABLA 9 - ERRORES RESIDUALES DE LOS RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN FINAL DEL MODELO

Min. Residual (m)	2.7	Standard Error of the Estimate (m)	2.67
Max. Residual (m)	34.67	Root Mean Squared (m)	17.75
Residual Mean (m)	14.43	Normalized RMS (%)	16.69
Abs. Residual Mean (m)	14.98	Correlation Coefficient	0.94

Fuente: Elaboración propia

4.2 Validación

Del mismo modo que en calibración, se procedió con la validación por medio de otra distribución de mediciones con alta densidad, los cuales corresponden temporalmente a los meses, junio y julio. Estos serían los pozos PM-5, PM-6, PM-7, PM-8, PM-9 y PM-10, obteniéndose los resultados de la TABLA 10.

TABLA 10 - RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MEDICIONES DE JUNIO Y JULIO

ID	X	Y	Z (m.s.n.m.)	Calc. (m.s.n.m.)	Obs. (m.s.n.m.)	Calc.-Obs. (m.s.n.m.)
PM-5	794791.80	8073864.20	2594.00	2598	2566.9	31.102
PM-6	793506.60	8074532.50	2597.00	2604.5	2592	12.58
PM-7	792125.00	8074831.00	2598.68	2606.6	2591	15.557
PM-8	796506.20	8074771.00	2597.00	2601.9	2590.1	11.882
PM-9	795820.20	8075191.30	2604.50	2604.8	2589.5	15.24
PM-10	795109.40	8076238.30	2610.00	2614.3	2590.6	23.763

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9, se observa el scatter plot de los datos obtenidos en la TABLA 10, del cual sus errores se describen en la TABLA 11.

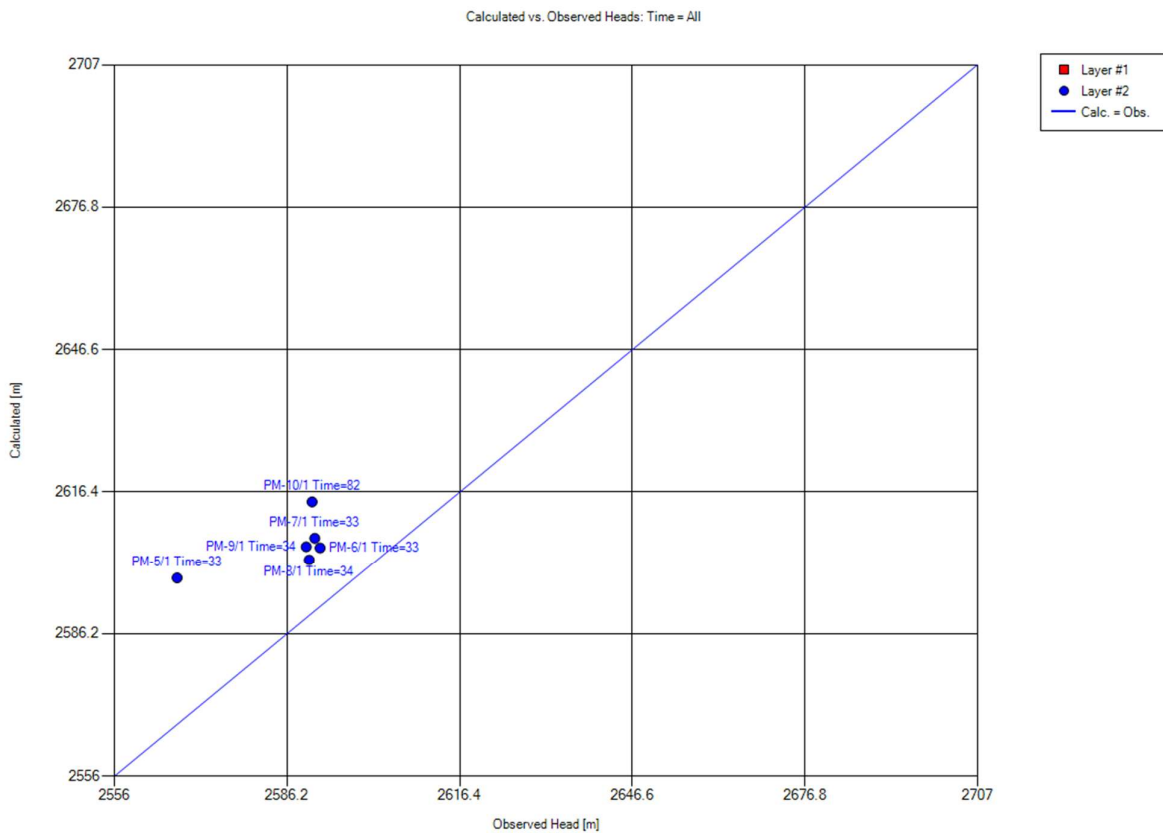


Figura 9: Scatter Plot de los niveles piezométricos calculados vs observados para la validación del modelo utilizando los pozos medidos de junio a julio.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la correlación reduce a un 0.63 y el RMS aumenta a 19 m, pero el RMS normalizado aumenta a 78%. Sin embargo, en vista que la mayoría de los datos se acomodan a la recta de dispersión y el coeficiente de correlación es alto, se puede concluir que el modelo es satisfactorio.

4.3 Dirección de Flujo Subterráneo

Se ha determinado la dirección de flujo subterráneo para el periodo de calibración, ver Figura 10. A la izquierda se tiene la dirección de flujo en base a los datos medidos en campo y a la derecha la superficie freática del modelo en MODFLOW. En ambos casos, la tendencia en la dirección de flujo es de norte a sur o de mayor a menor potencial hidráulico.

TABLA 11 - TABLA DE RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN FINAL DEL MODELO

Min. Residual (m)	11.88	Standard Error of the Estimate (m)	3.08
Max. Residual (m)	31.4	Root Mean Squared (m)	19.6
Residual Mean (m)	18.35	Normalized RMS (%)	78.38
Abs. Residual Mean (m)	18.35	Correlation Coefficient	0.63

Fuente: Elaboración propia.

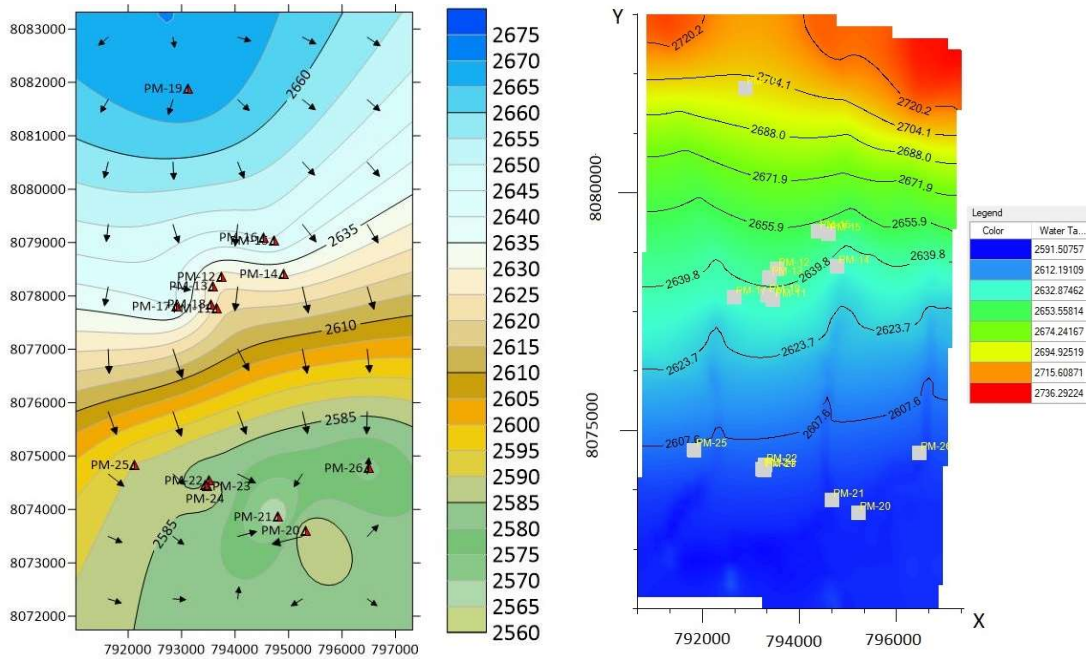


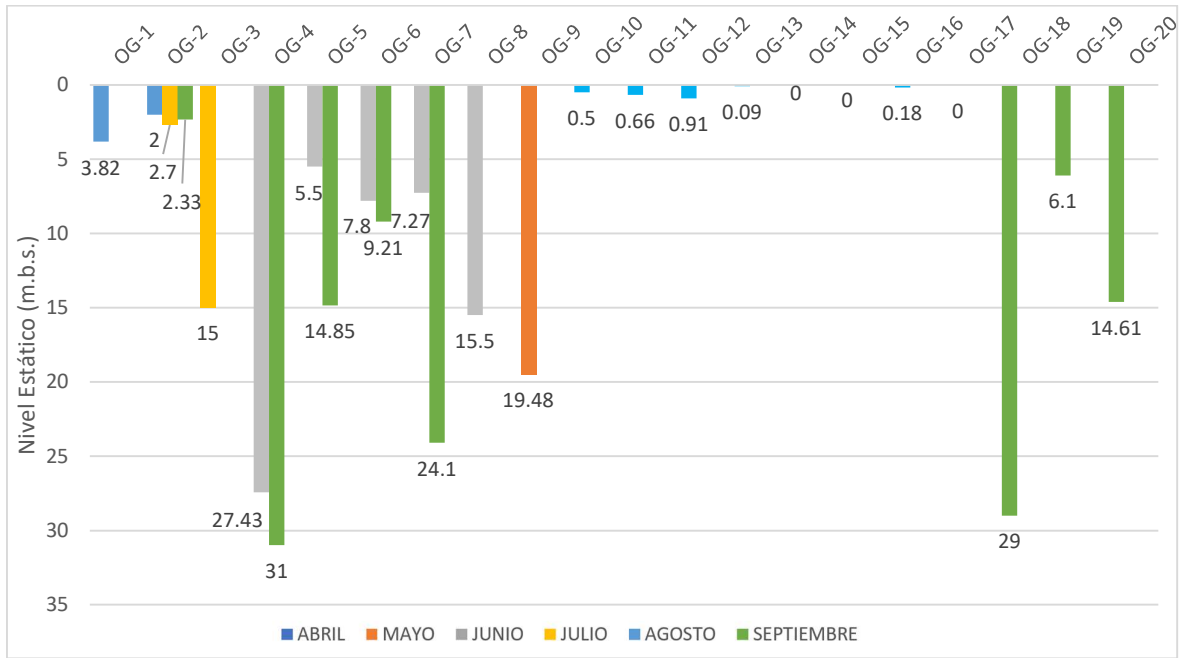
Figura 10: Curvas isofréaticas y dirección de flujo subterráneo. Datos medidos (izquierda) vs Datos calculados en el modelo (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Fluctuación de Niveles

Los niveles freáticos fluctúan dependiendo la explotación, la época y la cantidad de recarga que llega a la zona, principalmente. Para este estudio, se midieron algunos pozos en distintas épocas para su comparación, (ver Figura 11). El Pozo OG-2 se midió entre los meses de abril, julio y septiembre. El nivel se mantuvo cerca de los 2 metros sin mucha variación a comparación de los pozos que se midió entre junio y septiembre (OG-4, OG-5, OG-6 y OG-7), que la diferencia entre épocas es muy notoria, especialmente en el pozo OG-7 que cambió de 7 a 24 metros o el pozo OG-5 que cambió de 5.5 a 14.85 metros en sólo unos meses.

Se comparó las mediciones de los pozos OG-18 y OG-10 con las realizadas en otro estudio en 2019 [25], en la misma época del año (Agosto a Septiembre). Se puede observar en la Figura 12 que el nivel subió aproximadamente 5 metros para el pozo OG-18 y 3 metros para el pozo OG-10, estando su nivel muy cerca del nivel del terreno. Estos pozos se encuentran en un sector de recarga considerable por estar entre dos ríos, el Chijlawiri y Tolavi. Además, que el río Chijlawiri cuenta con caudales provenientes de la central hidroeléctrica de Misicuni [25].



m.b.s.: metros bajo superficie

Figura 11: Comparación de los niveles estáticos medidos en 2021.

Fuente: Elaboración propia.

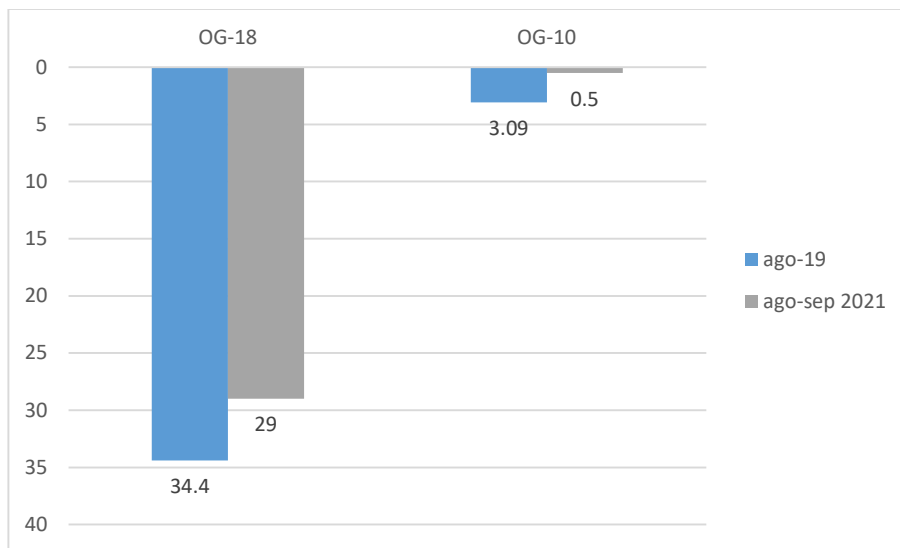


Figura 12: Comparación de los niveles estáticos medidos en 2019 vs 2021.

Fuente: Elaboración propia usando datos de 2019 [25].

5. CONCLUSIONES

Se realizó un inventario y monitoreo del nivel estático de los pozos de abastecimiento y posteriormente se procedió a configurar un modelo hidrogeológico conceptual y numérico en el valle central de Cochabamba.

La primera etapa del estudio fueron las campañas de medición del nivel freático de los pozos. Esta actividad se realizó en un periodo de 6 meses durante el año 2021, en la que se realizaron 26 mediciones, utilizando una sonda de nivel. Durante el monitoreo realizado al norte de Colcapirhua se pudo observar que los niveles estáticos eran muy pequeños o incluso se encontraban por encima del nivel del terreno, siendo un comportamiento característico de acuíferos surgentes. En campo se observó que el río Chijlawiri, proporciona una recarga significativa al sector oeste de la zona de estudio,

gracias a la Central Hidroeléctrica de Misicuni. La siguiente etapa fue la recopilación de información de estudios realizados en Valle Central, con la cual se pudo determinar cuatro estratos principales para el modelo: dos de arena, grava o bloques; y otras dos de limos y arcillas; de distintas conductividades. Mediante esta información, se configuró el modelo hidrogeológico en Visual MODFLOW Flex, en estado estacionario, donde se pudo determinar que los parámetros más sensibles son la conductividad hidráulica y los niveles piezométricos.

El modelo hidrogeológico mostró resultados aceptables cumpliendo los requisitos mínimos en la calibración y validación. Para la calibración se utilizó el periodo de agosto y septiembre donde se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.94, un RMS de 17.75 m. y un RMS normalizado de 16.69%, con lo que se concluyó que el modelo fue calibrado. Para la validación se utilizó el periodo de junio a julio, y la correlación disminuyó a 0.63 y el RMS aumentó a 19 m, pero el RMS normalizado a 78%. Se concluye que la mayoría de los datos se acomodan a la recta de dispersión y la correlación es mayor a 0.5, el modelo es satisfactorio.

La dirección principal de flujo subterráneo es de norte a sur, de mayor a menor potencial hidráulico. La variación de niveles en los meses de medidos muestra que el pozo OG-2 mantuvo su nivel, en cambio el resto de los pozos mostraron un descenso hasta septiembre, siendo el pozo OG-7 el más crítico, de casi 15 metros. Los pozos OG-10 y OG-18 se compararon con mediciones en la misma época realizadas en 2019, donde se observó una recarga de 3 a 5 metros para estos pozos. Es de vital importancia continuar con el monitoreo de niveles freáticos periódicamente, como también incluir la caracterización de la calidad de las aguas subterráneas en la zona de estudio.

REFERENCIAS

- [1] UN-Habitat, «Chapter 1: The Diversity of Cities and Visions for Urban Futures», en *World cities report 2022: envisaging the future of cities*, Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), 2022, pp. 1-30.
- [2] J. E. Cabrera, A. Alarcon, H. Terraza, D. Maleki, y S. Lew, *Plan de acción: Área metropolitana de Cochabamba sostenible*. ICES - Banco Interamericano de Desarrollo, 2013. doi: 10.13140/RG.2.1.1673.4961.
- [3] INE (Instituto Nacional de Estadística), «Población y Hechos Vitales», *INE*. <https://www.ine.gov.bo/index.php/censos-y-proyecciones-de-poblacion-sociales/> (accedido 31 de mayo de 2023).
- [4] OECD, *Drying Wells, Rising Stakes: Towards Sustainable Agricultural Groundwater Use*. en OECD Studies on Water. OECD, 2015. doi: 10.1787/9789264238701-en.
- [5] UN Water, Ed., *Groundwater making the invisible visible*. en The United Nations world water development report, no. 2022. Paris: UNESCO, 2022.
- [6] GADC (Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba), SDC (Servicio Departamental de Cuencas), y DGIA (Dirección de Planificación y Gestión Integral del Agua), «Plan Director de la Cuenca del río Rocha: “Estado de situación y propuesta de lineamientos estratégicos”», Cochabamba, 2014.
- [7] I. A. Shiklomanov, «World Freshwater Resources», en *Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources*, P. H. Gleick, Ed., New York: Oxford University Press, 1993, pp. 13-24.
- [8] IAH, «The UN-SDGs for 2030: Essential Indicators for Groundwater», 2017. [En línea]. Disponible en: <https://iah.org/wp-content/uploads/2017/04/IAH-Groundwater-SDG-6-Mar-2017.pdf>.
- [9] «Plan Maestro Metropolitano de Agua y Saneamiento de Cochabamba Bolivia: Informe Final. Resumen Ejecutivo», Cochabamba, 2014.
- [10] P. Dillon *et al.*, «Sixty years of global progress in managed aquifer recharge», *Hydrogeol J*, vol. 27, n.º 1, pp. 1-30, feb. 2019, doi: 10.1007/s10040-018-1841-z.
- [11] ONU-Agua, «Aguas Subterráneas Hacer visible el recurso invisible», París, Francia, 2022.
- [12] SEMAPA (Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado), «Estudio Socioeconomico», Cochabamba, 2016.
- [13] «Sistema de Información de Aguas Subterráneas de Bolivia - MMAyA - SIARH». <https://datos.siarh.gov.bo/index.php?module=siasbo&smodule=geovisor> (accedido 31 de mayo de 2023).
- [14] M. Velis, K. I. Conti, y F. Biermann, «Groundwater and human development: synergies and trade-offs within the context of the sustainable development goals», *Sustain Sci*, vol. 12, n.º 6, pp. 1007-1017, nov. 2017, doi: 10.1007/s11625-017-0490-9.
- [15] «CIICA forma parte de la plataforma de Aguas Subterráneas del Valle de Cochabamba | UPB». <https://www.upb.edu/es/contenido/ciica-forma-parte-de-la-plataforma-de-aguas-subterr%C3%A1neas-del-valle-de-cochabamba> (accedido 31 de mayo de 2023).
- [16] F. Montalvan, «Intervención de Monitoreo de Aguas Subterráneas en Bolivia inicia actividades de recolección de información y trabajo de campo en los municipios de Sacaba y Santa Cruz de la Sierra», *OTCA*, 30 de agosto de 2022. <http://otca.org/intervencion-monitoreo-de-aguas-subterraneas-en-bolivia/> (accedido 31 de mayo de 2023).
- [17] L. CR y Inayathulla, «Groundwater Flow Analysis Using Visual Modflow», *IOSR-JMCE*, vol. 12, n.º 2, pp. 05-09, abr. 2015, doi: 10.9790/1684-12270509.

- [18] P. C. Lakshmi y R. M. Narayanan, «Study on Groundwater Modeling of Aquifers Using Visual Modflow», *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 02, n.º 02, pp. 23-26, may 2015.
- [19] V. Hariharan y M. Uma Shankar, «A review of visual MODFLOW applications in groundwater modelling», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 263, p. 032025, nov. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/263/3/032025.
- [20] Sushant Kumar, M K Choudhary, y T R Nayak, «Groundwater Modelling in Bina River Basin, India using Visual Modflow», 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.31215.33440.
- [21] S. S. Sathe y C. Mahanta, «Groundwater flow and arsenic contamination transport modeling for a multi aquifer terrain: Assessment and mitigation strategies», *Journal of Environmental Management*, vol. 231, pp. 166-181, feb. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.08.057.
- [22] W. Liu *et al.*, «Quantifying the streamflow response to groundwater abstractions for irrigation or drinking water at catchment scale using SWAT and SWAT–MODFLOW», *Environ Sci Eur*, vol. 32, n.º 1, p. 113, dic. 2020, doi: 10.1186/s12302-020-00395-6.
- [23] X. Li *et al.*, «Study of groundwater using visual MODFLOW in the Manas River Basin, China», *Water Policy*, vol. 18, n.º 5, pp. 1139-1154, oct. 2016, doi: 10.2166/wp.2016.180.
- [24] J. F. Ortiz Céspedes, «Análisis del potencial hídrico subterráneo, en la zona de K'juchu Punata, mediante modelación con Visual Modflow», Proyecto de Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Católica Boliviana «San Pablo», Cochabamba, 2013.
- [25] L. Rosales, O. C. Saavedra, y W. Soruco, «MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN UN ABANICO ALUVIAL DE COCHABAMBA-BOLIVIA», *I&D*, vol. 20, n.º 1, pp. 51-66, jul. 2020, doi: 10.23881/idupbo.020.1-4i.
- [26] J. T. Saavedra, L. A. Rosales, y O. C. Saavedra, «MODELACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL VALLE DE COCHABAMBA UTILIZANDO MODFLOW», *I&D*, vol. 20, n.º 1, pp. 81-88, jul. 2020, doi: 10.23881/idupbo.020.1-6i.
- [27] ASF DAAC, «PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res». NASA Alaska Satellite Facility DAAC, 2014. doi: 10.5067/Z97HFCNKR6VA.
- [28] C. Ledo, «Documento de Trabajo Negowaat Bolivia N° 4. Tiquipaya: Urbanización e infraestructura». 2005.
- [29] SEI (Stockholm Environmental Institute) US Center, «Formulación y Actualización del Plan Director de la Cuenca del Río Rocha, bajo un enfoque de Adaptación al Cambio Climático. Entregable C: “Caracterización de la Cuenca del río Rocha”», Cochabamba.
- [30] educa.com, «Colcapirhua - Municipio de Quillacollo», 22 de diciembre de 2015. <https://www.educa.com.bo/geografia/colcapirhua-municipio-de-quillacollo> (accedido 31 de mayo de 2023).
- [31] GAM Colcapirhua (Gobierno Autónomo Municipal de Colcapirhua), «Plan Territorial de Desarrollo Integral del Gobierno Autónomo Municipal de Colcapirhua. Diagnóstico 2016 - 2020». 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.colcapirhua.gob.bo/pdf/planificacion/PDTI_COLCAPIRHUA_DIAGNOSTICO_PARTE_I.pdf
- [32] S. Renner y C. Velasco, «Geología y Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba. – Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERGEOMIN)». 2000.
- [33] Waterloo Hydrogeologic, «User’s Manual. Visual MODFLOW Flex 6.1. Integrated Conceptual & Numerical Groundwater Modeling Software», Waterloo, Canada, 2019.
- [34] D. K. Todd y L. W. Mays, *Groundwater hydrology*, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.