

Artículo Original

Aplicación de Modflow 6 con Model Mouse 4 para el modelamiento del flujo subterráneo de la microcuenca Macarí, Melgar - Perú

APPLICATION OF MODFLOW 6 WITH MODEL MOUSE 4 FOR THE MODELING OF THE GROUNDWATER FLOW OF THE MACARI-MELGAR MICRO-BASIN IN PERU

JOSÉ LUIS AHUANLLA HUACCHA¹, RENNY DANIEL DIAZ AGUILAR¹, JUAN EDUARDO VIGO RIVERA¹, ROSE ADELINA CALLATA CHURA¹

Recibido: 24 diciembre de 2021 / Aceptado: 28 febrero de 2022

¹Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú

Resumen

Los recursos hidrogeológicos en la microcuenca Macarí son limitados e imprescindibles, debido a la variabilidad climática en la región. Sin embargo, el aumento de las actividades agrícolas, ganaderas y crecimiento poblacional, contribuyen a la intensificación del estrés en los recursos hídricos. La presente investigación tuvo por objetivo determinar el balance hídrico, mediante el modelamiento del flujo subterráneo con el software Modflow 6 con Model Mouse 4 en la microcuenca Macarí ubicada en la provincia de Melgar, departamento de Puno - Perú. La metodología del estudio se realizó en 3 fases: en la primera fase se determinó la ubicación, en la segunda se adquirieron datos de diferentes instituciones como la Autoridad Nacional del Agua, Instituto Nacional Geográfico, satelital ALOS PALSAR y datos meteorológicos de la estación de Chuquibambilla para obtener la tasa de evapotranspiración potencial, en la tercera fase se realizó el procesamiento de datos en el software Modflow 6 con Model Mouse 4 donde se importaron todas las variables obtenidas (DEM, pozos y ríos). Los resultados muestran una recarga de 1.4971 m³/s de infiltración en el subsuelo en sus diferentes capas. En la descarga tenemos el drenaje por los ríos que conforman la microcuenca con un total 0.9474 m³/s, y descarga por evapotranspiración que es la absorción de la planta del subsuelo 0.5498 m³/s. En conclusión, mediante el balance hídrico, se observó la distribución de agua en el subsuelo y que la gran mayoría se descarga por drenaje en los ríos que conforma la microcuenca.

Palabras clave: flujo subterráneo, modelo hidrogeológico, Modflow 6

Abstract

The hydrogeological resources in the Macarí micro-basin are limited and essential, due to the climatic variability in the region. However, the increase in agricultural and livestock activities and population growth contribute to the intensification of stress on water resources. The objective of this research was to determine the water balance, through the modeling of the underground flow with the Modflow 6 software with Model Mouse 4 in the Macarí micro-basin located in the province of Melgar, department of Puno - Peru. The methodology of the study was carried out in 3 phases: in the first phase the location was determined, in the second phase data was acquired from different institutions such as: the National Water Authority, National Geographic Institute, ALOS PALSAR satellite and meteorological data from the station. of Chuquibambilla to obtain the potential evapotranspiration rate, in the third phase the data processing was carried out in the Modflow 6 software with Model Mouse 4 where all the variables obtained (DEM, wells and rivers) were imported. The results show a recharge of 1.4971 m³/s of infiltration in the subsoil in its different layers. In the discharge we have the drainage by the rivers that make up the micro-basin with a total of 0.9474 m³/s, and discharge by evapotranspiration, which is the absorption of the subsoil plant, 0.5498 m³/s. In conclusion, the distribution of water in the subsoil was observed through the water balance and that the vast majority is discharged by drainage in the rivers that make up the micro-basin.

Keywords: groundwater flow, hydrogeological model, Modflow 6

INTRODUCCIÓN

El constante uso del agua para las diferentes actividades humanas nos hace ver cuán importante es este recurso para la vida, más aún en la microcuenca Macarí de la Región Puno – Perú, por las diferentes actividades antropogénicas como la ganadería, agricultura y abastecimiento de agua potable para consumo humano, que tiene valor económico, social y ambiental en todos los usos que se le destina (Millares, 2008).

Valdez (2018) declara, que los recursos hidrogeológicos en la microcuenca Macarí de la Región Puno – Perú, son limitados e imprescindibles debido a la variabilidad climática que existe en la región y por su ubicación, representan característica semiárida. La población de Macarí cuenta con una población de 8 532 habitantes (INEI, 2018). De esta población el 74.70% utiliza pozos artesanales para sus diferentes actividades (ganadería, agricultura y abastecimiento de agua) y que estos afectan a la reducción del agua subterránea, respecto a los servicios higiénicos el 74% de la población utiliza pozo ciego o letrina en un estado muy deteriorado, que generan impactos negativos al recurso hidrogeológico (Pauca, 2016). Debido a estas actividades y el incremento de la población, contribuyen a la intensificación del estrés en los recursos hídricos (GRP a, 2016).

Los procesos hidrogeológicos y ecosistémicos interactúan estrechamente por recarga o descarga en su medio litológico, por esa razón se observa la ausencia de corrientes superficiales permanentes (Li *et al.*, 2019). Adicionalmente, las regiones de suelos áridos y semiáridos, ha llevado al deterioro de suelo y deterioro de la calidad de agua (Lachaal *et al.*, 2012). A su vez, el nivel freático puede ofrecer una oportunidad que proporciona gran parte del agua para la vegetación y así disminuir los efectos negativos de las sequías, por el contrario, también puede convertirse en una amenaza si aumenta el riesgo de anegamiento e inundaciones, ocasionando la salinización del suelo y con consecuencia de reducir la productividad de los cultivos (Aragón *et al.*, 2011).

Khan *et al.* (2017) explican, que el software Modflow 6 con Model Mouse 4, permite modelar el agua subterránea con el fin de evaluar la dinámica del recurso en diferentes escenarios que comprende controles sobre; el bombeo de aguas subterráneas, mejoras en la infraestructura del canal y cambios en la precipitación. En el valle del Cariri, parte del sur del Estado de Brasil realizaron una metodología que aplica el método de elementos analíticos para el modelado del flujo de acuífero regionales, este método tiene como principio la superposición de funciones analíticas que resuelven problemas complejos de flujo (Cabrera y Hernández, 2011). Este programa es un modelo de flujo que realiza en tres dimensiones, conformándose como una valiosa herramienta que ha sido utilizada en estudios de modelación de acuíferos contaminados (Gómez *et al.*, 2013). En un estudio realizado en Nottinghamshire, un condado en el este de Midlands (Inglaterra), los autores utilizaron el programa Modflow para establecer las direcciones de flujo como una base para el transporte de solutos y los procesos de atenuación natural de contaminantes, constituidos de amonio y compuestos orgánicos que son generados en una antigua central térmica, cuyo efluente contaminó el acuífero subyacente al área (Mehl y Hill, 2002).

La microcuenca Macarí, presenta zonas semiáridas, disminución de cauces, lugares de empinamiento, poca vegetación y uso indiscriminado del recurso hídrico (Ramos, 2013). Por consiguiente, la disminución de fuentes de aguas en las comunidades aledañas en el Distrito de Macarí, trae consecuencia de desabastecimiento en meses de estiaje (INRENA, 2008). No obstante, el agua subterránea puede ser considerada como una fuente alternativa de

abastecimiento de agua a las comunidades alejadas y poblaciones concentradas, debido a que este recurso está disponible durante todo el año (Valdez, 2018). Es por ello, que se realizó el presente estudio con el fin de modelar el agua subterránea mediante el programa Modflow 6 con Model Mouse 4 para evaluar el comportamiento de este recurso. Considerando que, según Emamgholizadeh *et al.* (2014), este software desarrollado por la USGS (U.S. Geological Service) puede ser utilizado para simular los efectos del flujo de pozos, arroyos, ríos, drenaje, evapotranspiración y recarga en límites heterogéneos y complejos en un sistema de flujo, su enfoque de diferentes finitas provee la capacidad de calcular el régimen de flujo con excepcional control sobre la discrepancia del balance hídrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁMBITO DE ESTUDIO

El área delimitada es la microcuenca Macarí desde la parte alta hasta su influencia con la población, comprende un área total de 14211.23 Has, ubicada en el distrito Macarí de la provincia Melgar-Puno, con coordenadas UTM este 282,829 a 298,251 y Norte 8'379,384 a 8'388,262 a una altitud promedio de 4.029 msnm (Canahua, 2017). La figura 1 muestra la ubicación de microcuenca Macarí.

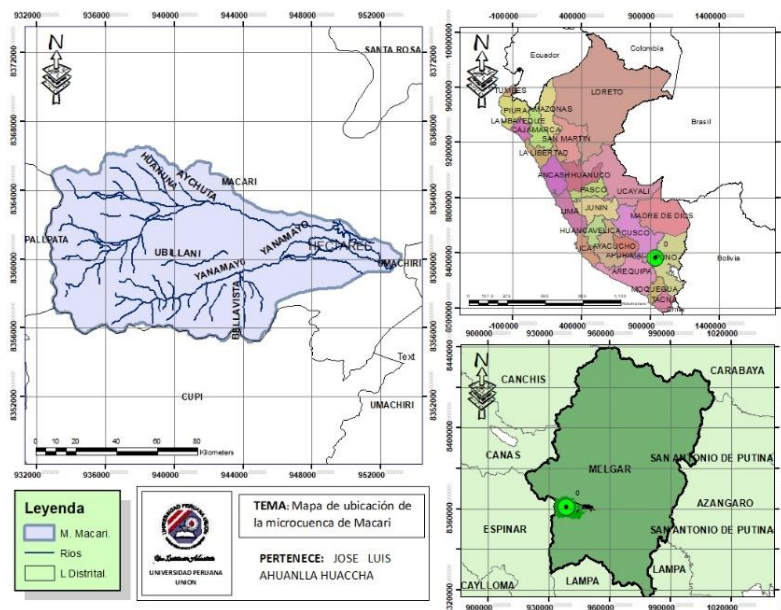


Figura 1. Mapa de ámbito de estudio: Ubicación de la microcuenca Macarí

OBTENCIÓN DE DATOS

Para el modelamiento correspondiente de la microcuenca Macarí, fue necesario tener suficientes datos meteorológicos, tasa de evapotranspiración, tasa de recarga y parámetros hidráulicos. También fue imprescindible el uso de las variables como son el DEM (modelo digital de elevación), ríos y pozos.

Así mismo, para el modelamiento del flujo subterráneo, los datos de diversas fuentes fueron recopilados, procesados y organizados en un sistema de coordenadas espaciales y así posibilitando el desarrollo de una base de datos estadísticos con el Microsoft Excel y espaciales bajo el sistema de información geográfica ArcGIS (versión 10.5).

Para la obtención de todas las variables se procedió a extraer de las diferentes instituciones (Tabla 1), la variable DEM se obtuvo del satelital ALOS PALSAR con una corrección de 12.5 metros. Datos sobre los ríos fueron descargados de la página web IGN (Instituto Geográfico Nacional) y finalmente la variable de pozos de la metadata ANA (Autoridad Nacional del Agua).

Tabla 1. Variables a utilizar para el modelamiento de flujo subterráneo.

Variabes	Formato	Web de instituciones
DEM	Raster	Satelital ALOS PALSAR
Pozos	Shapefile	ANA
Ríos	Shapefile	ING

DATOS METEOROLÓGICOS Y USO DE CAPACIDAD DE SUELOS

Se determinó las condiciones de orden: drenaje, evapotranspiración y recarga. El drenaje es una red de transporte superficial que suele llegar a permeabilizarse al subsuelo (Chura, 2015), que en nuestra de área de interés se consideró un $K = 1E-4$. Para la evapo-transpiración se utilizaron los datos meteorológicos del año 2019 de la estación Chuquibambilla, que brinda datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, para realizar su correspondiente análisis estadístico con Microsoft Excel (Tabla 2). La evapotranspiración potencial se determinó mediante la fórmula de Thornthwaite (Schosinsky, 2007).

$$ETP_{anual} = \frac{N}{12} * \frac{d}{30} * 16 * \left(\frac{10+t}{I}\right)^a \quad Ecu. (1)$$

Donde “ T ” es el índice de calor anual, “ N ” es el número máximo de horas de sol, “ d ” es el número de días del mes, “ t ” es la temperatura mensual °C, “ a ” es la función de I .

Tabla 2. Cálculo de tasa de evapotranspiración anual según el método Thornthwaite.

Año 2015	Temp. media (°C)	(i) índice térmico mensual	ETP Teórica	(N)	$f = \frac{N}{12}$	N° de días por mes	(d/30)	ETP (mm/mes)
Enero	11.2	3.4	33.4	12.9	1.1	31.0	1.0	37.2
Febrero	11.4	3.5	33.6	12.5	1.0	28.0	0.9	32.7
Marzo	10.8	3.2	32.7	12.2	1.0	31.0	1.0	34.3
Abril	10.2	2.9	31.8	11.8	1.0	30.0	1.0	31.2
Mayo	7.7	1.9	27.7	11.5	1.0	31.0	1.0	27.4
Junio	3.8	0.7	19.5	11.3	0.9	30.0	1.0	18.3
Julio	2.1	0.3	14.6	11.4	0.9	31.0	1.0	14.3
Agosto	3.6	0.6	19.1	11.7	1.0	31.0	1.0	19.1
Setiembre	7.5	1.8	27.3	12.0	1.0	30.0	1.0	27.3
Octubre	6.8	1.6	26.1	12.4	1.0	31.0	1.0	28.0
Noviembre	9.6	2.7	30.9	12.8	1.1	30.0	1.0	33.1
Diciembre	9.5	2.6	30.7	13.0	1.1	31.0	1.0	34.5
<i>ETP: anual</i>								337.3

Nota: (N) = número máximo de horas de sol; f =factor de reducción; ETP = evapotranspiración potencial.

La tasa de recarga anual requiere dos aspectos indispensables: el coeficiente de infiltración y la profundidad efectiva del suelo, la obtención de estos datos se realizó mediante recopilaciones bibliográficas realizadas en el departamento de Puno en un estudio de fisiografía de acuerdo al tipo de suelo que conforma la región, y estos resultados obtuvieron con la ecuación adoptada de Guther Schosinsky (2007) donde ellos realizaron un método de cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos (GRP b, 2014). El resultado obtenido fue 331.2 mm/año, con la siguiente ecuación:

$$R = P + H_{si} - ETR - H_{sf}. \quad \text{Ecu. (2)}$$

Donde “R” es el cálculo de la recarga potencial, “P” es la precipitación acumulativo, “H_{si}” es la humedad inicial, “ETR” es la evapotranspiración real y “H_{sf}” es la humedad final.

PROCESAMIENTO DE DATOS

Con la obtención de las variables y las condiciones de orden, se procesó en el software Modflow 6 con Model Mouse 4. Primero importamos las variables: DEM, ríos y pozos. Luego activamos el solucionador UPW (Ponderación de aguas arriba) que ayuda a determinar las condiciones de orden: drenaje, evapotranspiración y recarga. Finalmente, determinamos la conductividad hidráulica que está relacionada al tipo de suelo (Sardon y Mamani, 2014). Ver ecuación 3.

La microcuenca Macarí presenta suelos de tipo franco arcilloso (Sardon y Mamani, 2014). Además, Angelone *et al.* (2006) menciona, que el tipo de suelo permite determinar la permeabilidad ($k = 0.0004$). La evapotranspiración obtenida con la ecuación Schosinsky fue 337 mm/año que estuvo relacionada a la profundidad de la raíz de la planta que fue 0.5 m, en la recarga corresponde 331 mm/año de acuerdo con la región de estudio.

$$Case(Layer, 1E - 4, 1E - 5, 1E - 7, 1E - 8, 1E - 9) \quad \text{Ecu. (3)}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el modelo se obtuvieron la profundidad promedio del nivel estático, para así poder interpretarlas. Así mismo este software muestra cortes en toda el área de estudio los cuales son: el Top (parte superior de la cuenca), Front (parte frontal de la cuenca), Side (parte lateral de la cuenca) y vista en 3D.

MODELO DE FLUJO SUBTERRÁNEO DE CORTE SUPERIOR

Los resultados de corte superior nos muestran que la mayor concentración de agua está en las faldas de las colinas de la microcuenca, donde existe una población concentrada con alta presencia de pozos artesanales. La Figura 2 muestra el modelamiento de corte superior de la microcuenca Macarí Región Puno – Perú.

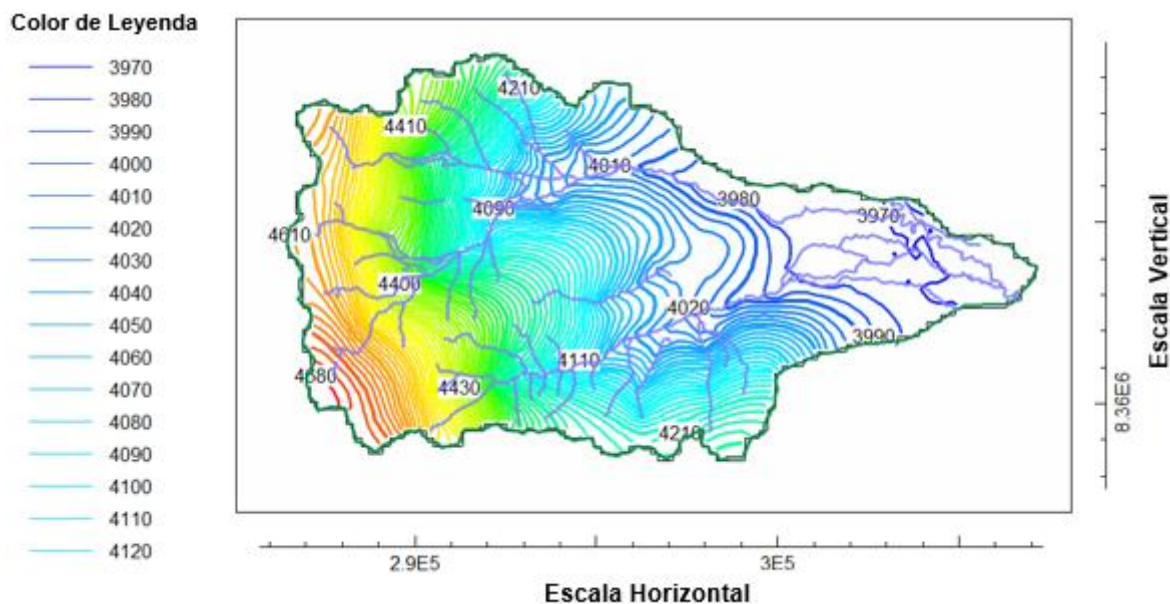


Figura 1. Modelamiento de corte superior de la microcuenca Macarí Región Puno – Perú.

El modelamiento del flujo subterráneo de corte superior de la microcuenca Macarí de la Región Puno – Perú, muestra sus respectivas cotas (Figura 2), su cota mínima es 3970 msnm y cota máxima es de 4680 msnm, dentro de esta área se puede observar que el porcentaje mayor de agua se encuentra en sus cauces principales, y su mayor concentración está a partir de la cota 4090 msnm hacia abajo. Cabe destacar que el área de estudio presenta características semiáridas, por su variabilidad climática y su ubicación (Valdez, 2018). Un estudio similar realizaron en el departamento de Cusco provincia Santo Tomas, donde ejecutaron un modelamiento hidrogeológico con la finalidad de evaluar el flujo subterráneo del valle de la quebrada Anrohujo, en donde identificaron un sistema de tres unidades hidrogeológicas: depósitos cuaternarios, roca fracturada y roca competente, en el acuífero se consideraron como ingreso la infiltración que procede de la precipitación y a la descarga de aguas subterráneas a los drenajes superficiales (Vegas *et al.*, 2015).

En la cuenca del río Limpopo, donde calibraron y evaluaron para un caudal mensual de 1984 a 2013 compararon las estimaciones de la profundidad del nivel freático, este nivel parece generalmente poco profundo en los meses de verano tienen la recarga más alta con un promedio de 147 mm/año, seguidos por otoño con un promedio de 27 mm/año, primavera con 3.2 mm/año e invierno con menor recarga estacional de 0.3 mm/año durante el periodo de estudio de 30 años (Mosase *et al.*, 2019). Así mismo, es innegable la influencia que ejerce el medio geológico en el control de la hidrología superficial y subterránea (Castañeda y Ingol, 2016). En relación con estos estudios, es importante reconocer las unidades lito estratigráficas en la microcuenca Macarí, para considerar el ingreso de infiltración y la descargar por drenajes superficiales; asimismo, la micro cuenta estudiada tiene una precipitación promedio de 696 mm/año en los meses de verano.

MODELO DE FLUJO SUBTERRÁNEO DE CORTE FRONTAL.

En este corte se muestra la distribución de agua en las tres capas definidas que fueron capa aluvial, capa fracturado superior y capa fracturado inferior (Figura 3).

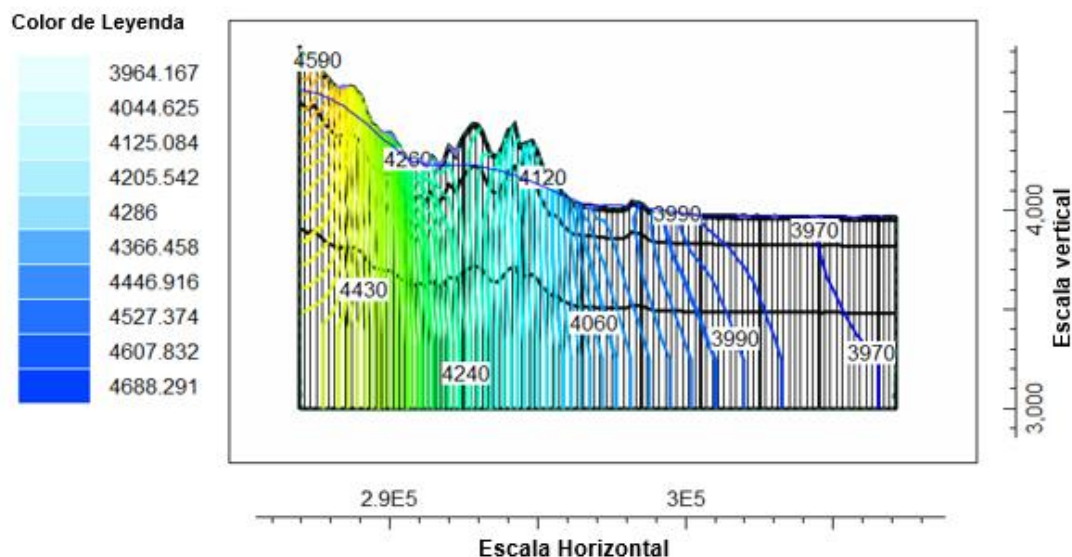


Figura 3. Modelamiento de corte frontal de la microcuenca Macarí de la Región Puno - Peru.

En su corte frontal, se observa la napa freática que está en el nivel máximo en las quebradas de la microcuenca y su distribución de agua en el subsuelo donde hay una cantidad considerable que se reparte a las profundidades de la capa. Además, los funcionamientos hidrogeológicos en las laderas de las cuencas alto andinas se recarga por las aguas de precipitación que se infiltra al acuífero y esta pasa a circular a los cauces que constituye el principal elemento de drenaje y los ríos que se originan en su mayoría de las nevadas, por tal motivo presentan ríos ganadores que reciben agua del acuífero, con un importante componente subterráneo en el caudal de su base (IGME, 2015).

Así mismo, cuando comienza el deshielo en cuencas alto andinas, los suelos se empapan de agua y conforme el hielo se retira van drenando lentamente, debido a que en general su permeabilidad es moderada. Al principio solo funciona durante las horas más cálidas del día, pues durante la noche la salida del agua se interrumpe por congelamiento, para poco a poco incrementar el periodo diario de drenaje, alimentando en los tramos altos de los cauces y arroyos, de esta forma aseguran en la cabecera de la cuenca un caudal permanente en los ríos y arroyos durante todo el estiaje (Barrientos, 2011). Además, en un estudio de agua subterránea del acuífero Kabodarahang, ubicado en Irán, provincia de Hamadan donde ellos simulaban mediante tres modelos: Modflow, Extrem Learning (ELM), Wavelet-Extreme, con el fin de evaluar el nivel del agua subterránea sus resultados de ELM se compararon con el resultado de Modflow, los valores del nivel del agua subterránea con mayor precisión fue de ELM que muestra un valor de coeficiente mayor que la de software Modflow de 0.959 y ellos concluyen que el software ELM su precisión es más efectiva sin embargo es menos utilizada debido a que recientemente es publicado este software (Malekzadeh *et al.*, 2019).

En cuanto al área de estudio, también es una cuenca alto andina, sus fuentes de agua nacen en la cabecera de la cuenca, sus precipitaciones mayormente forman cauces de agua y en tiempo de estiaje, las temperaturas suelen bajar a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto evidencia el constante curso de agua en los ríos. Así abastece a la población y toda vegetación de la microcuenca. En cuanto al software Modflow es la más utilizada y recomendada por la Autoridad Nacional del Agua en nuestro territorio peruano.

BALANCE HÍDRICO EN LA MICROCUENCA MACARÍ

En la tabla 3 se observa que el único ingreso de agua al acuífero es por recarga mediante la infiltración con un total de $1.4971\text{ m}^3/\text{s}$, esto quiere decir que el acuífero de la microcuenca tiene un buen almacenamiento y el subsuelo tienen una buena permeabilidad ya que presentan suelos franco arcillosos. Por otro lado el aumento de la permeabilidad conduce al incremento del caudal infiltrado, también canaliza a un aumento del flujo hacia las profundidades inaccesibles de las raíces (Galarza *et al.*, 2001). Así mismo cuando el suelo en general es limo-arenoso y presenta mayor pendiente, tiende a tener mayor permeabilidad (Yagual, 2016). Por ende, la microcuenca modelada que tiene una extensión de 14211.2 ha , tiene una buena permeabilidad de acuerdo al tipo de suelo que presenta.

Tabla 3. Entrada del agua al acuífero

Condición de orden	Cantidad de agua aportada	Unidades
Drenaje	0.0000	m^3/s
Evapotranspiración.	0.0000	m^3/s
Recarga.	1.4971	m^3/s
Total	1.4971	m^3/s

En la tabla 4 se muestra la salida del recurso hídrico, donde se distribuye por drenaje y evapotranspiración; la descarga que se da por drenaje (flujo base) tuvo un promedio $0.9474\text{ m}^3/\text{s}$, mientras que la descarga por evapotranspiración (consumo de agua por la vegetación) fue de $0.5498\text{ m}^3/\text{s}$, eso quiere decir que en el área de estudio no existe grandes extensiones de bofedales, solo pastizales en gran masa, porque el porcentaje mayor se va por drenaje y en menor cantidad es aprovechada por los pastizales en general que existe en la zona.

Tabla 4. Salida de agua del subsuelo.

Condición de orden	Cantidad de agua aportada	Unidades
Drenaje	0.9474	m^3/s
Evapotranspiración	0.5498	m^3/s
Recarga	0.0000	m^3/s
Total	1.4971	m^3/s

Gutierrez *et al.* (2004) menciona, que las condiciones de drenaje subterráneo en la zona de las sierras, están vinculadas al relieve, al espesor de la capa meteorizada a las características dicláicas y fisuras de las rocas, a la cobertura vegetal y a las condiciones climáticas. Así mismo, cuando la recarga del acuífero es muy baja, las aguas subterráneas poseen un gran tiempo de residencia (Vargas, 2013). Además, Carroll *et al.* (2008) indican, en su modelamiento en la cuenca del río Guadalupe, Venezuela, que las mayores extracciones se producen en otoño y sobre todo en verano, donde el ritmo de extracción alcanza los $78356\text{ m}^3/\text{día}$. Por tanto, las descargas en el área de estudio, pueda estar llevándose por actividades humanas que son la agricultura, ganadería y para el consumo humano de pozos artesianos.

CONCLUSIONES

Se realizó satisfactoriamente el modelamiento de agua subterránea en la microcuenca Macarí de la Región Puno – Perú, mediante el software Modflow 6 con Model Mouse 4, donde se observó el balance hídrico; así mismo, muestra su nivel freático y su distribución de agua al subsuelo que está conformado por diferentes capas. Además, presenta una cota máxima 4680 msnm y una cota mínima de 3970 msnm.

Por las diferentes actividades que realizan en la microcuenca Macarí de la Región Puno –Perú, como: la ganadería, agricultura y abastecimiento de agua potable para el consumo humano vienen afectando el recurso hídrico en la microcuenca y ello justifica el balance hídrico obtenido mediante el software Modflow 6 con Model Mouse 4 que la gran mayoría de agua es conducido por drenaje con un total 0.9474 m³/s, esto debido a que el área de estudio presentan 7 ríos como son: Yanamayo, Ubillani, Bellavista, Turmanamayoc, Huañuna, Aychuta y Huasaruna.

Finalmente este balance hídrico nos muestra que las actividades humanas, generan un impacto negativo al recurso hidrogeológico. Con el pasar del tiempo este recurso puede llegar a disminuirse drásticamente, porque las autoridades locales y la población no toman en conciencia este aspecto que es indispensable para la sostenibilidad del recurso agua y todo el ecosistema de la microcuenca Macarí-Melgar de la Región Puno –Perú.

Referencias

- Angelone, S., Garibay, M. T., y Cauhapé C., M. (2006). Geología y Geotecnia - Permeabilidad de suelos. En *Universidad Nacional de Rosario*.
[https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad en Suelos.pdf](https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf)
- Aragón, R., Jobbágy, E., y Viglizzo, E. (2011). Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *ECOHYDROLOGY*, 447(August 2010), 433–447.
<https://doi.org/10.1002/eco>
- Barrientos, J. (2011). *Modelo de Gestión integrada de recursos hídricos de las cuencas de los ríos Moquegua y Tambo* (Número Agosto) [Universidad de Piura].
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1480/MAS_GAA_012.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cabrera, E., y Hernandez, A. (2011). Modelación del agua subterránea a escala regional con refinamiento local de la malla . Planteamiento y validación del algoritmo. *SciELO*, II(Marzo), 65–82.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222011000100005&script=sci_abstract
- Canahua, I. (2017). Historia de límites de la región de Puno en el periodo republicano hasta el año 2017 [Universidad Nacional del Altiplano Puno]. En *Repositorio Institucional UNA-PUNO* (Número Diciembre). <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6911>
- Carroll, R. W. H., Pohl, G. M., Earman, S., y Hershey, R. L. (2008). A comparison of groundwater fluxes computed with MODFLOW and a mixing model using deuterium : Application to the eastern Nevada Test Site and vicinity. *ScienceDirect*, 361(Noviembre), 371–385.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.08.005>
- Castañeda, M., y Ingol, E. (2016). Modelamiento en la Gestión del Agua Subterránea. *Revista de Autoridad Nacional del Agua*, 1–4. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2616>
- Chura, L. (2015). Evaluación de agua subterránea a través de pozos con fines de riego en la comunidad de quenpajja -Acora [Universidad Nacional del Altiplano]. En *Repositorio Institucional UNA-PUNO*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4593>
- Emamgholizadeh, S., Moslemi, K., y Karami, G. (2014). Prediction the Groundwater Level of Bastam *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo* (2021) 7(1):1-11

- Plain (Iran) by Artificial Neural Network (ANN) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). *Water Resour Manage*, October, 2–14. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0810-0>
- Galarza, G., Carrera, J., y Alfageme, H. (2001). *Simulación de los procesos de infiltración en zonas áridas y semiáridas. Aplicación al diseño de la cobertera de la FUA*. 112, 37–50. http://www.igme.es/boletin/2001/112_esp_1-2001/2-SIMULACION.pdf
- Gómez, G., Morales, G., Macedo, G., y Pavón, T. (2013). 1 Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal s/n, Col. Insurgentes Este, C.P. 212280, Mexicali, Baja California, México 2 Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Co. *Revista Nacional de Contaminación Ambiental*, 29(Junio), 119–126.
- GRPa, (Gobierno Regional de Puno). (2016). Plan Regional De Gestion De Riesgo De Desastres 2016 - 2021. En *Gobierno Regional Puno* (Vol. 53, Número 9). http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA_PUBLICAR/OTROS/PLAN_REGIONAL_DE_GESTION_DE_RIESGO_DE_DESASTRES_2016_-_2021.pdf
- GRPb, (Gobierno Regional Puno). (2014). *Estudio de suelos y capacidad de uso mayor*. http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/Archivos/Mapa/puno/Memoria_Descriptiva_Suelos_CUM.pdf
- Gutierrez, M., Márquez, J., Materón, H., y Rojas, H. (2004). Modelación de acuíferos para el aprovechamiento sostenible del agua subterránea. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 1(Febrero), 1–13. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231117826006%0ACómo>
- IGME. (2015). *Investigación hidrogeológica de acuíferos de alta montaña sometidos a uso intensivo del agua subterránea. cabecera del río bércules (sierra nevada, granada)*. Diciembre, 1–27. http://info.igme.es/SidPDF/166000/952/166952_0000001.pdf
- INEI. (2018). *Puno Resultados Definitivos*. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1563/
- INRENA, (Instituto Nacional de Recursos Naturales). (2008). *Inventario de Fuentes de Aguas Superficiales en la Cuenca Del río Ramis*. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiauvaUitPuAhWef7kGHfYEANcQFjABegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fsiar.minam.gob.pe%2Fpuno%2Fdownload%2Ffile%2Ffid%2F59594&usg=AOvVaw2A9WpV6GX2eVZW_2mggmXb
- Khan, H. F., Yang, Y. C. E., Ringler, C., Wi, S., Cheema, M. J. M., y Basharat, M. (2017). Guiding Groundwater Policy in the Indus Basin of Pakistan Using a Physically Based Groundwater Model. *ASCELibrary*, 143(Marzo), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000733](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000733).
- Lachaal, F., Mlayah, A., Bedir, M., Tarhouni, J., y Leduc, C. (2012). Implementation of a 3-D groundwater flow model in a semi-arid region using ramdine – Beni Hassen Miocene aquifer MODFLOW and GIS tools: The Ze system (east-central Tunisia). *Computers & Geosciences journal*, 48(Mayo), 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.007>
- Li, F., Liu, Y., Zhao, Y., Deng, X., y Jiang, R. (2019). Regulation of shallow groundwater based on MODFLOW. *Applied Geography*, 110(June 2018), 102049. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102049>
- Malekzadeh, M., Kardar, S., y Shabanlou, S. (2019). Simulation of groundwater level using MODFLOW, extreme learning machine and Wavelet-Extreme Learning Machine models. *Groundwater for Sustainable Development*, 9(September), 100279. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100279>
- Mehl, S., y Hill, M. (2002). Evaluation of a local grid refinement method for steady - state block - centered finite - difference groundwater models. *Developments in Water Science*, 47(1), 367–374. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(02\)80084-3](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(02)80084-3)
- Millares, A. (2008). *Integración del caudal base en un modelo distribuido de cuenca. estudio de las aportaciones subterráneas en ríos de montaña* [Universidad de Granada]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=65727>
- Mosase, E., Ahiablame, L., Park, S., y Bailey, R. (2019). Modelling potential groundwater recharge in the Limpopo River Basin with. *Groundwater for Sustainable Development*, 9(August), 100260. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100260>

- Paucar, E. (2016). Sistema de abastecimiento de agua potable en las urbanizaciones nuevo progreso y unión milluni del Distrito de Macarí, Provincia de Melgar - Región [Univerisdad Nacional del Altiplano]. En *Repositorio Institucional UNA-PUNO*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/13291>
- Ramos, A. (2013). *Aplicación de un modelo de redes de flujo en el balance hídrico de la Sub Cuenca San Jose - Azángaro - Puno* [Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4520>
- Sardon, S., y Mamani, H. (2014). *Estudio fisiográfico (Departamento de Puno)*. http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/Archivos/Mapa/puno/Memoria_Descriptiva_Fisiografia.pdf
- Schosinsky, G. (2007). Calculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central, Enero*, 13–30. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/download/4223/4047>
- Valdez, D. (2018). Evaluación de los recursos hidricos en la subcuenca del río San José - Azángaro [Universidad Nacional del Altiplano]. En *Repositorio Institucional UNA-PUNO*. EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ – AZÁNGARO
- Vargas, D. (2013). Universidad de chile facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería civil [Universidad de Chile]. En *Repositorio académico de la Universidad de Chile*. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114462>
- Vegas, F., Andres, N., y Zappa, M. (2015). Simulación y caracterización del régimen natural de descargas diarias en los andes del sur del Perú: región de Apurímac y Cusco Simulation and characterization of natural regime of daily discharge in the southern Andes of Peru: Apurimac and Cusco regions. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA*, 18(4), 1–18. https://web2.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2015_vol04/paper1.pdf
- Yagual, O. (2016). *Modelación de Flujo Subterráneo . Aplicación en la cuenca del Milagro- Ecuador y análisis de pozo en subcuenca del Río Suquía Modelación de Flujo Subterráneo . Aplicación en la cuenca del Milagro- Ecuador y análisis de pozo en subcuenca del Río Suquía* [Universidad Nacional de Córdoba]. <https://core.ac.uk/download/pdf/72041521.pdf>