Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2026,
Volumen 10, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i5

INTERVALO ÓPTIMO DE MONITOREO AUTOMÁTICO DEL NIVEL FREÁTICO EN EL ACUÍFERO VILLACURÍ (PERÚ) PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA SUBTERRÁNEA

OPTIMAL AUTOMATIC WATER-LEVEL MONITORING INTERVAL IN THE VILLACURÍ AQUIFER (PERU) FOR SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCE MANAGEMENT

Guillermo Clemente Aguilar Giraldo
Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

Estefani Mishel Ibarra Rivera
Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

Absalón Vásquez Villanueva
Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i5.26426

Intervalo Óptimo de Monitoreo Automático del Nivel Freático en el Acuífero Villacurí (Perú) para la Gestión Sostenible del Agua Subterránea

Guillermo Clemente Aguilar Giraldo[1]
aggc@lamolina.edu.pe
https://orcid.org/0000-0001-5543-2618
Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú

Estefani Mishel Ibarra Rivera
estefani.ibarra.rivera@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-6051-5907
Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú

Absalón Vásquez Villanueva
avasquez@lamolina.edu.pe
https://orcid.org/0000-0002-0837-3501
Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú

RESUMEN

El monitoreo de niveles freáticos es fundamental para la gestión de acuíferos, pero la selección inadecuada de la frecuencia de registro puede generar volúmenes de datos innecesarios o perder información hidrológicamente relevante. El presente estudio tuvo como objetivo determinar el intervalo de medición que permita capturar las fluctuaciones representativas de la carga hidráulica en el acuífero Villacurí (costa sur de Perú), optimizando así los recursos técnicos y económicos destinados al monitoreo. Se analizaron registros históricos (20202023) de 22 piezómetros, proporcionados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Mediante pruebas t de Student para muestras pareadas, implementadas en RStudio, se compararon las variaciones diarias, semanales y mensuales de los niveles freáticos, estableciendo un umbral mínimo de cambio hidráulicamente significativo de 0.05 m. Adicionalmente, se generaron mapas de hidroisohipsas y de fluctuación espacial mediante interpolación por Kriging simple en ArcGIS, con procesamiento automatizado a través de Model Builder. Los resultados demostraron que los intervalos diarios y semanales capturan principalmente ruido asociado a bombeos locales, con variaciones promedio inferiores a 0.05 m y escasa significación estadística ($p > 0.05$). En contraste, el intervalo mensual reflejó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) y variaciones superiores a 0.05 m en la mayoría de los piezómetros, coincidiendo con tendencias estacionales y procesos de recarga/descargas regionales. Los mapas generados confirmaron un gradiente hidráulico estable desde el noreste hacia el noroeste, con descensos generalizados del nivel freático (hasta 9 m anuales) atribuibles a la extracción intensiva. Se concluye que el monitoreo mensual constituye el periodo óptimo para el registro automático en el acuífero Villacurí, ya que equilibra la representatividad hidrogeológica con la eficiencia operativa. Se recomienda ampliar la red de piezómetros y actualizar anualmente los mapas para mejorar los modelos de gestión y planificación del recurso.

Palabras clave: monitoreo de niveles freáticos, registro automático de datos, gestión de acuíferos

[1] Autor principal
Correspondencia: aggc@lamolina.edu.pe

Optimal automatic water-level monitoring interval in the Villacurí aquifer (Peru) for sustainable groundwater resource management

ABSTRACT

Groundwater level monitoring is essential for aquifer management; however, an inadequate selection of recording frequency may either generate unnecessary data volumes or fail to capture hydrologically relevant information. This study aimed to determine the measurement interval that effectively captures representative fluctuations in hydraulic head within the Villacurí aquifer (southern coast of Peru), thereby optimizing the technical and economic resources allocated to monitoring. Historical records (2020–2023) from 22 piezometers, provided by the National Water Authority (Autoridad Nacional del Agua – ANA), were analyzed. Paired-sample Student's t-tests, implemented in RStudio, were used to compare daily, weekly, and monthly variations in groundwater levels, establishing a minimum threshold of 0.05 m for hydraulically significant change. Additionally, water-table contour maps and spatial fluctuation maps were generated using simple Kriging interpolation in ArcGIS, with automated processing via Model Builder. Results demonstrated that daily and weekly intervals predominantly capture noise associated with local pumping, exhibiting average variations below 0.05 m and limited statistical significance ($p > 0.05$). In contrast, the monthly interval reflected statistically significant differences ($p < 0.05$) and variations exceeding 0.05 m in most piezometers, coinciding with seasonal trends and regional recharge/discharge processes. The generated maps confirmed a stable hydraulic gradient from the northeast toward the northwest, with widespread groundwater level drawdowns (up to 9 m annually) attributable to intensive abstraction. It is concluded that monthly monitoring constitutes the optimal period for automatic recording in the Villacurí aquifer, as it balances hydrogeological representativeness with operational efficiency. It is recommended to expand the piezometer network and to update the maps annually in order to improve resource management and planning models

***Keywords*:** water table monitoring, automatic data recording, aquifer management

Artículo recibido 10 agosto 2026
Aceptado para publicación: 19 septiembre 2026

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de agua subterránea para fines agrícolas, urbanos e industriales ha intensificado la presión sobre los acuíferos en regiones áridas y semiáridas, donde la recarga natural es limitada (Alley, 2009; Fetter, 2018). En este contexto, el monitoreo sistemático de los niveles freáticos se convierte en una herramienta indispensable para evaluar la disponibilidad del recurso, detectar tendencias de sobreexplotación y fundamentar medidas de regulación (Butler et al., 2021). Sin embargo, la frecuencia de medición –diaria, semanal o mensual– debe ser cuidadosamente seleccionada, pues intervalos muy cortos generan grandes volúmenes de datos que dificultan su procesamiento e interpretación, mientras que intervalos muy largos pueden omitir cambios hidráulicamente relevantes (Sánchez et al., 2017).

El acuífero Villacurí, localizado en la provincia de Ica (Perú), constituye una de las principales fuentes de abastecimiento para la agricultura intensiva de la región, con más de 1,200 pozos registrados. Estudios previos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2018) han señalado problemas de descenso progresivo del nivel freático y deterioro de la calidad del agua, lo que hace imperativo optimizar las estrategias de monitoreo. No obstante, hasta la fecha no se ha definido un intervalo de registro automático que garantice la captura eficiente de las fluctuaciones del nivel freático sin sobrecargar los sistemas de gestión de datos.

Por ello, el presente trabajo plantea como objetivo general determinar el periodo óptimo de registro automático de niveles freáticos en el acuífero Villacurí, mediante la integración de análisis estadístico (prueba t de Student) y geoestadístico (Kriging simple). Como objetivos específicos se plantean: (i) evaluar la significancia estadística de las variaciones en intervalos diarios, semanales y mensuales; (ii) generar mapas de hidroisohipsas y fluctuación espacial que permitan visualizar la dinámica del acuífero; y (iii) automatizar el procesamiento de datos para asegurar la reproducibilidad y estandarización de los mapas. Los resultados permitirán orientar a los gestores del agua hacia una toma de decisiones más eficiente, basada en información representativa y oportuna.

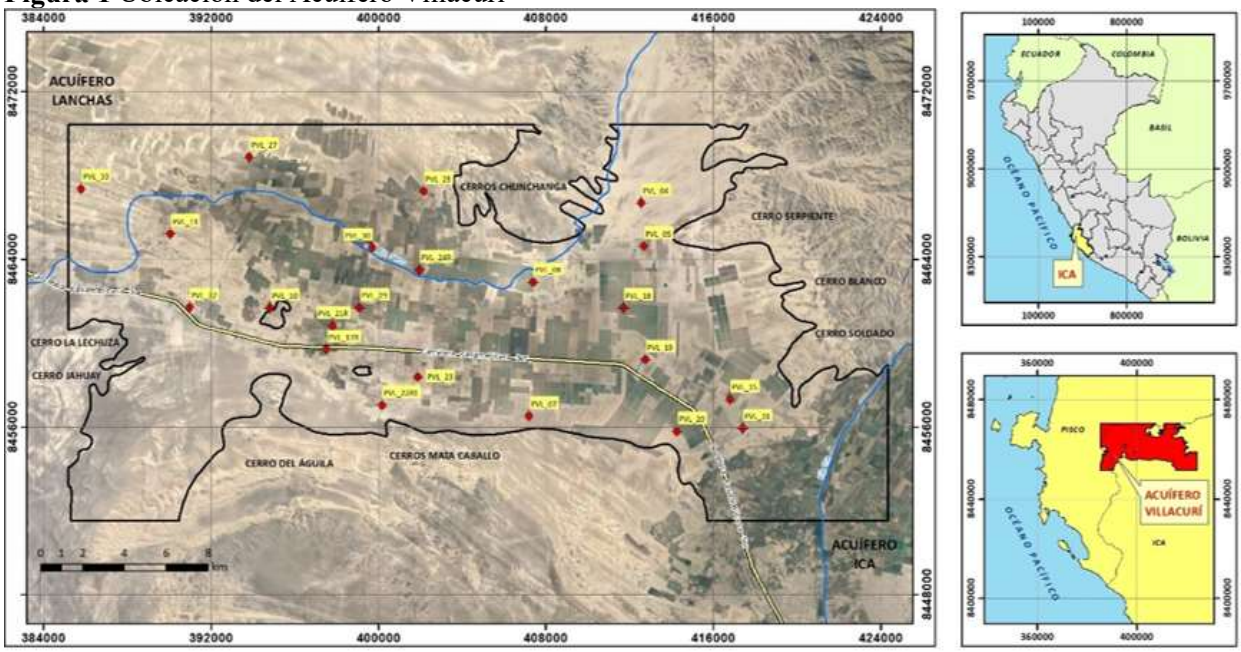
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El acuífero Villacurí se ubica en el distrito de Salas, provincia y departamento de Ica, entre los kilómetros 258 y 291 de la Carretera Panamericana Sur. Geográficamente, se extiende entre las coordenadas UTM 383,794 – 421,894 m E y 8,449,470 – 8,470,954 m N. Se utilizaron registros de

niveles freáticos correspondientes a 22 piezómetros distribuidos en el acuífero, con mediciones horarias durante el periodo 20202023, proporcionadas por el Observatorio Nacional de Recursos Hídricos de la ANA. Los datos incluyeron coordenadas, cota de boca y carga hidráulica. (ver Figura 1)

Se han identificado un total de 1,257 pozos en el área de Villacurí, de los cuales el 41.93% se encuentran actualmente en funcionamiento equipados con motor y bomba, el 22.28 % en estado utilizable con equipos deteriorados y el 35.80 % no utilizables por sequedad, colapso, enterramiento, salinización o desviación de tubería [4].

Figura 1 Ubicación del Acuífero Villacurí



METODOLOGÍA

Materiales

Datos e información

Registros históricos de niveles freáticos (2020-2023) de 22 piezómetros del acuífero Villacurí, proporcionados por la ANA a través del Observatorio Nacional de Recursos Hídricos. Los datos incluyen coordenadas, cota y carga hidráulica.

Los principales softwares utilizados así como los esquipos son:

- RStudio - análisis estadístico (prueba t de Student)
- ArcMap (ArcGIS) - geoprocesamiento, interpolación Kriging simple y Model Builder

- Microsoft Excel - organización y exportación de datos en formato CSV
- Computadora de escritorio con capacidad suficiente para procesamiento estadístico y geoestadístico
- Disco duro externo

Métodos

Recolección de data

Los sistemas de monitoreo automatizado, como los sistemas SCADA, permiten la supervisión continua en tiempo real de variables críticas como niveles de agua, caudales y presiones, contribuyendo a la operación eficiente de los sistemas de suministro de agua y a la toma de decisiones informadas para garantizar la sostenibilidad a largo plazo del acuífero **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

En ese sentido, se utilizó la información histórica de las cargas hidráulicas provenientes de la red de monitoreo piezométrico de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), correspondientes al período 2020–2023, obtenida a través del Observatorio Nacional de Recursos Hídricos. En particular, se recopiló el registro de 22 piezómetros distribuidos en el área de estudio, que incluye coordenadas, cota y carga hidráulica.

Análisis estadístico en RStudio e identificación del tiempo de registro óptimo de las cargas hidráulicas

Para el análisis temporal de las cargas hidráulicas y la determinación del período óptimo de registro automático, se utilizó RStudio mediante la prueba t de Student, que compara las medias de dos grupos de datos en un período determinado de tiempo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Esta prueba evalúa la magnitud de la diferencia entre las medias en relación con la variabilidad de los datos dentro de cada grupo, proporcionando como resultado un estadístico t y su correspondiente valor de significancia estadística (p-valor).

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Donde $\bar{X}_1$ y $\bar{X}_2$ son las medias de los dos grupos; s_1^2 y s_2^2 sus varianzas; y n_1 y n_2 los tamaños de muestra.

La prueba fue bilateral con un nivel de significancia estadística del 5%, evaluándose las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula (Ho): Las medias de los dos grupos son iguales ($\mu 1=\mu 2$).
- Hipótesis alternativa (Ha): Las medias de los dos grupos son diferentes ($\mu 1\neq\mu 2$).

El p-valor obtenido permitió determinar si las diferencias observadas entre las medias eran estadísticamente significativas. Cuando el p-valor fue menor a 0.05, se rechazó la hipótesis nula, concluyéndose que existían diferencias significativas entre los grupos analizados. En caso contrario, no se contó con evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula.

Los registros de las cargas hidráulicas se agruparon en intervalos diarios, semanales y mensuales, ejecutando la prueba t de Student de forma automatizada mediante un script desarrollado en RStudio. Para cada piezómetro se compararon los diferentes intervalos temporales con el objetivo de evaluar si la reducción de la frecuencia de registro permitía conservar información representativa del comportamiento del acuífero.

Considerando la lenta dinámica del flujo de agua subterránea **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, además del criterio de significancia estadística se estableció un umbral mínimo de variación de 0.05 m (5 cm) para identificar cambios relevantes en las cargas hidráulicas. De esta manera, cuando el p-valor fue menor a 0.05 y la variación promedio superó los 5 cm, se interpretó que la frecuencia de registro era suficiente para detectar cambios reales en las cargas hidráulicas.

Este análisis proporcionó una base cuantitativa para identificar los piezómetros que presentaban variaciones significativas en función del período evaluado y, a partir de ello, determinar el intervalo óptimo de registro automático para el monitoreo del acuífero.

Aplicación del método de interpolación Kriging

A partir de la determinación del análisis temporal, se utilizó el software ArcMap para el análisis espacial de la información hidrogeológica, mediante el cual se realizaron procesos de interpolación espacial para la generación de mapas hidroisohipsas de la superficie piezométrica y mapas de fluctuación de niveles freáticos.

Se seleccionó el método de Kriging simple para estimar la carga hidráulica en puntos no muestreados del acuífero Villacurí. El Kriging simple es un método de interpolación espacial geoespacial que se

emplea cuando se asume que la media de la variable es constante y conocida en toda el área de estudio, utilizando un variograma para determinar la relación espacial entre los puntos muestreados, basadas en la autorrelación espacial de datos **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i)$$

Donde $Z^*(x_0)$ es la estimación en el punto x_0, $Z(x_i)$ son los valores observados y λ_i los pesos asignados a cada observación. Se elaboraron variogramas para evaluar la variabilidad espacial de los datos.

La semivarianza, que mide la variación entre pares de puntos en función de la distancia entre ellos, es el fundamento del variograma experimental **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. El variograma experimental se generó a partir de los puntos de muestreo y se ajustó a modelos teóricos (esférico, exponencial, lineal, etc.) seleccionándose el que mejor describió la dispersión **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. El análisis de tendencia espacial de los datos permite además descomponer los datos en componentes significativos, facilitando la identificación de patrones regionales y variaciones locales **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. La validación del método incluyó el análisis de semivariogramas experimentales ajustados a modelos teóricos, cuyos componentes principales son la meseta, la pepita y el alcance **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Investigaciones previas han aplicado diferentes variantes del método Kriging para la optimización de redes de monitoreo de niveles de agua subterránea, demostrando que el Kriging con modelo de semivariograma exponencial proporciona el mejor ajuste en casos similares **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Asimismo, estudios de evaluación de niveles regionales de agua subterránea han validado la eficacia del Kriging espacio-temporal para comprender y predecir cambios en los niveles de agua, contribuyendo a una mejor gestión de los recursos hídricos **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Análisis de errores

Se evaluó la precisión de la interpolación generada mediante el método de Kriging simple comparando la carga hidráulica observada con la calculada para cada piezómetro. El error se definió como:

$$\text{Error} = \text{Carga hidráulica observada} - \text{Carga hidráulica calculada}$$

Los parámetros del modelo de interpolación fueron ajustados iterativamente con el objetivo de minimizar dicho error, de modo que la representación espacial del nivel freático reflejara adecuadamente la realidad.

Elaboración de mapas de hidroisohipsas y fluctuación de cargas hidráulicas

Para la elaboración de los mapas de hidroisohipsas y de fluctuación de cargas hidráulicas, se utilizó la herramienta Model Builder de ArcGIS, que permite automatizar procesos repetitivos e integrar diversas herramientas y flujos de trabajo facilitando la creación de modelos de análisis espacial y geoprocesamiento **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. En el caso de los mapas de hidroisohipsas, el proceso abarcó la importación de datos desde archivos CSV, la conversión en capas espaciales, la incorporación del Modelo Digital de Elevación (DEM), la obtención de la dirección de flujo y la generación de curvas hidroisohipsas. Para los mapas de fluctuación, se realizó la diferencia entre rásteres de distintos períodos, permitiendo visualizar las variaciones temporales en la carga hidráulica. La automatización mediante Model Builder garantizó la eficiencia, reproducibilidad y consistencia en los flujos de trabajo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Análisis de hidrogramas de piezómetros

A partir de la información de cargas hidráulicas se elaboraron hidrogramas en los piezómetros que permitieron visualizar el comportamiento temporal de las cargas hidráulicas durante el periodo 2020 al 2023. Los hidrogramas de pozos constituyen una herramienta fundamental para visualizar la variación temporal de los niveles de agua en el acuífero e identificar patrones de fluctuación, tendencias, y la respuesta del sistema a bombeos cercanos o variaciones en la presión barométrica **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis estadístico e identificación del tiempo de registro óptimo

De acuerdo con la **Tabla 1**, en los análisis estadísticos realizados para intervalos diarios y semanales, si bien en algunos casos se presentan diferencias estadísticas, las variaciones promedio del nivel freático son generalmente menores a 0.05 m, lo que indica que estos intervalos capturan principalmente fluctuaciones menores que no representan cambios significativos en el comportamiento hidrogeológico

del acuífero. Estas variaciones de corto plazo pueden estar influenciadas por factores temporales como el bombeo de pozos cercanos o condiciones locales transitorias **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

En contraste, para un intervalo mensual, la mayoría de las comparaciones presentan valores de significancia estadística menores a 0.05, lo que indica la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones. Asimismo, las diferencias promedio del nivel freático son en su mayoría mayores o iguales a 0.05 m, lo que evidencia variaciones hidráulicamente relevantes en la dinámica del acuífero. Resultados similares han sido reportados en estudios de tendencias a largo plazo y análisis espacio-temporal de niveles de agua subterránea, donde intervalos mensuales han demostrado ser representativos de la dinámica acuífera **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Estos resultados demuestran que un intervalo de monitoreo menor genera una densidad elevada de datos sin aportar información relevante sobre cambios estructurales del nivel freático. Por el contrario, el intervalo mensual permite registrar variaciones representativas del sistema acuífero, optimizando la frecuencia de medición y la gestión de los datos de monitoreo.

En ese sentido, considerando el criterio conjunto de significancia estadística ($p < 0.05$) y variación hidráulicamente representativa ($\Delta h \geq 0.05$ m), se determina que el intervalo mensual constituye el periodo óptimo para el registro automático del nivel freático en el acuífero Villacurí, ya que permite registrar las tendencias del sistema, optimizando la frecuencia de monitoreo sin pérdida de información significativa.

Tabla 1 Resumen del valor de significancia estadística de las cargas hidráulicas

Piezómetro	Variable	2020			2021			2022			2023		
		diario	semanal	mensual	diario	semanal	mensual	diario	semanal	mensual	diario	semanal	mensual
PVL_04	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**
	prom.:	0.00	0.01	0.06	0.00	0.01	**0.05**	0.00	0.01	**0.05**	0.00	0.01	**0.05**
PVL_05	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
	prom.:	0.00	0.02	0.07	0.00	0.00	**0.26**	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	**0.05**
PVL_07	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	**0.00**	**0.00**	0.03	**0.00**	**0.00**
	prom.:	0.01	0.06	0.25	0.00	0.07	**0.31**	0.01	**0.08**	**0.36**	0.01	**0.06**	**0.23**
PVL_08	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	**0.00**	0.01	**0.00**	**0.00**	0.04	**0.00**	**0.00**
	prom.:	0.02	0.10	0.33	0.01	**0.14**	**0.33**	0.03	**0.10**	**0.37**	0.00	**0.18**	**0.18**
PVL_10	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**
	prom.:	0.00	0.02	0.11	0.00	0.00	**0.09**	0.00	0.01	**0.05**	0.01	0.02	**0.05**
PVL_11	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
	prom.:	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.09**
PVL_15	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.06	0.00
	prom.:	0.02	0.03	0.10	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	**0.05**	0.01	0.04	0.02
PVL_17R	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	**0.00**	**0.00**	0.00	0.22	**0.00**
	prom.:	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	**0.14**	0.02	**0.07**	**0.24**	0.02	0.04	**0.07**
PVL_18	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**
	prom.:	0.00	0.02	0.06	0.01	0.03	**0.19**	0.01	0.03	**0.09**	0.00	0.00	**0.55**
PVL_19	P-valor:	0.00	0.76	0.00	0.00	**0.17**	**0.00**	0.00	**0.43**	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**
	prom.:	0.01	0.05	0.23	0.02	**0.05**	**0.20**	0.02	**0.05**	**0.20**	0.00	0.00	**0.08**
PVL_20	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
	prom.:	0.01	0.04	0.17	0.00	0.00	**0.09**	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	**0.05**
PVL_21R	P-valor:	0.71	0.25	0.00	0.01	**0.01**	**0.00**	0.00	**0.43**	**0.00**	0.00	0.00	0.00
	prom.:	0.43	0.31	0.01	2.74	**0.90**	**0.36**	0.02	**0.05**	**0.15**	0.02	0.01	0.03
PVL_22R1	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**	0.04	0.01	**0.00**
	prom.:	0.00	0.01	0.10	0.00	0.02	**0.10**	0.00	0.02	**0.09**	0.02	0.04	**0.16**
PVL_23	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Piezómetro	Variable	2020			2021			2022			2023		
		diario	semanal	mensual	diario	semanal	mensual	diario	semanal	mensual	diario	semanal	mensual
	prom.:	0.00	0.03	0.11	0.00	0.02	**0.09**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PVL_24R	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**	0.00	**0.88**	**0.00**
	prom.:	0.00	0.01	0.09	0.00	0.03	**0.13**	0.01	0.02	**0.07**	0.00	**0.05**	**0.25**
PVL_25	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.01**
	prom.:	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	**0.05**	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	**0.06**
PVL_27	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	**0.32**	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**
	prom.:	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	**0.06**	0.01	**0.05**	**0.23**	0.00	0.00	**0.05**
PVL_29	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	0.00
	prom.:	0.03	0.02	0.03	0.02	**0.06**	**0.13**	0.01	0.03	**0.09**	0.00	0.00	0.00
PVL_30	P-valor:	0.06	0.02	0.00	0.04	**0.00**	**0.00**	0.85	**0.00**	**0.01**	0.15	0.24	**0.00**
	prom.:	0.16	0.07	0.06	0.01	**0.39**	**1.87**	0.05	**0.18**	**0.09**	0.03	0.12	**0.81**
PVL_31	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	0.97	0.00	0.00	**0.00**
	prom.:	0.01	0.02	0.04	0.00	0.00	**0.19**	0.01	0.01	0.00	0.01	0.07	**0.28**
PVL_32	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	0.00
	prom.:	0.00	0.01	0.05	0.00	0.01	**0.05**	0.01	0.01	**0.06**	0.00	0.00	0.03
PVL_33	P-valor:	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**0.00**
	prom.:	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	**0.05**	0.00	0.00	**0.06**

Aplicación del método Kriging

Se aplicó el método de interpolación Kriging simple para estimar la carga hidráulica en puntos no muestreados del acuífero Villacurí. Los variogramas experimentales generados a partir de los puntos de muestreo mostraron que la distribución de datos se ajustó predominantemente a un modelo teórico lineal. Este comportamiento es consistente con la hipótesis de estacionaridad intrínseca, donde la variabilidad del atributo aumenta de manera constante con la distancia **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Análisis de errores

Se comparó la carga hidráulica observada con la carga hidráulica calculada, de cada piezómetro, los cuales fueron generados a través del método Kriging simple. Este análisis permitió evaluar la precisión de las estimaciones y detectar posibles sesgos en el modelo a fin de evidenciar el comportamiento del acuífero.

El análisis de errores reveló que el valor absoluto de los errores obtenidos fue menor a 0.01 m en todos los casos, indicando que las estimaciones del Kriging simple se encuentran dentro de un margen aceptable de precisión y respalda la confiabilidad del modelo utilizado. Este nivel de precisión es comparable a los resultados obtenidos en investigaciones similares sobre la caracterización espacial de niveles freáticos mediante métodos geoestadísticos **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, lo que respalda la confiabilidad del modelo utilizado para la interpolación en el acuífero Villacurí.

Elaboración de mapas de hidroisohipsas y fluctuación de cargas hidráulica

Se emplearon dos flujos de trabajo en Model Builder de ArcMap para la generación de mapas de hidroisohipsas y de fluctuación de las cargas hidráulicas, facilitando la elaboración automatizada de contornos, dirección de flujo, diferencias entre rásteres, entre otros procesos.

Con relación a la **Figura 2**, se muestra el flujo metodológico automatizado para el procesamiento de la información orientado a la generación de mapas de hidroisohipsas. Este proceso inicia con la importación de los datos extraídos del Observatorio de Recursos Hídricos desde un archivo Excel en formato CSV, los cuales son convertidos en capas espaciales. Posteriormente, se incorpora el Modelo Digital de Elevación (DEM), el cual es procesado para obtener la dirección de flujo y las curvas de

hidroisohipsas. Finalmente, se integran y extraen los valores de carga hidráulica en los puntos de monitoreo para su representación espacial.

Asimismo, la **Figura 3** se muestra el flujo metodológico automatizado para la generación de mapas de fluctuación de las cargas hidráulicas. El proceso inicia con el ingreso de los niveles freáticos interpolados correspondientes a dos periodos de análisis (obtenidos en el proceso descrito en el párrafo precedente), los cuales son procesados mediante operaciones raster para obtener el mapa de fluctuación del nivel freático, representando la diferencia espacial entre ambos escenarios temporales. Posteriormente, el modelo convierte automáticamente estos resultados en capas vectoriales y aplica simbología estandarizada para su correcta representación cartográfica.

Este flujo automatizado permitió optimizar el procesamiento de la información, asegurar la reproducibilidad de los resultados y estandarizar la generación de los mapas hidrogeológicos del acuífero Villacurí.

Figura 2 Programación en Model Builder para elaboración de hidroisohipsas

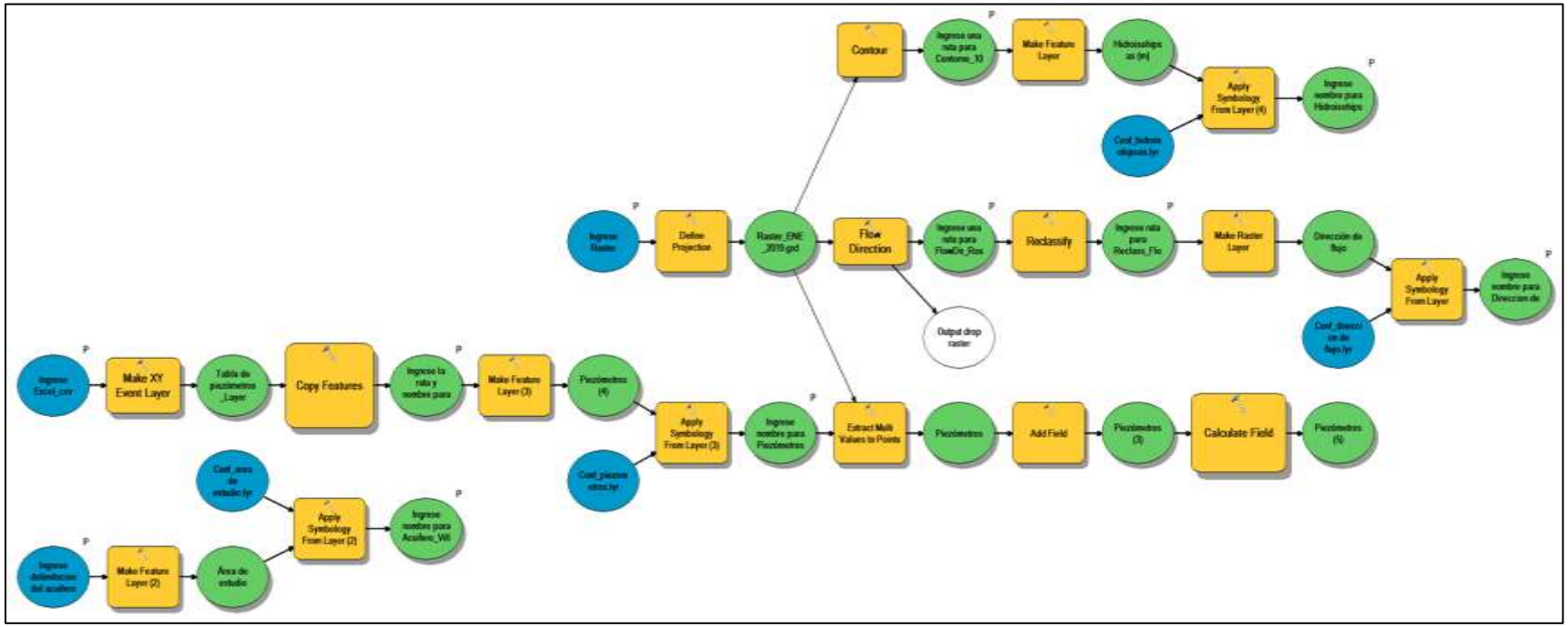
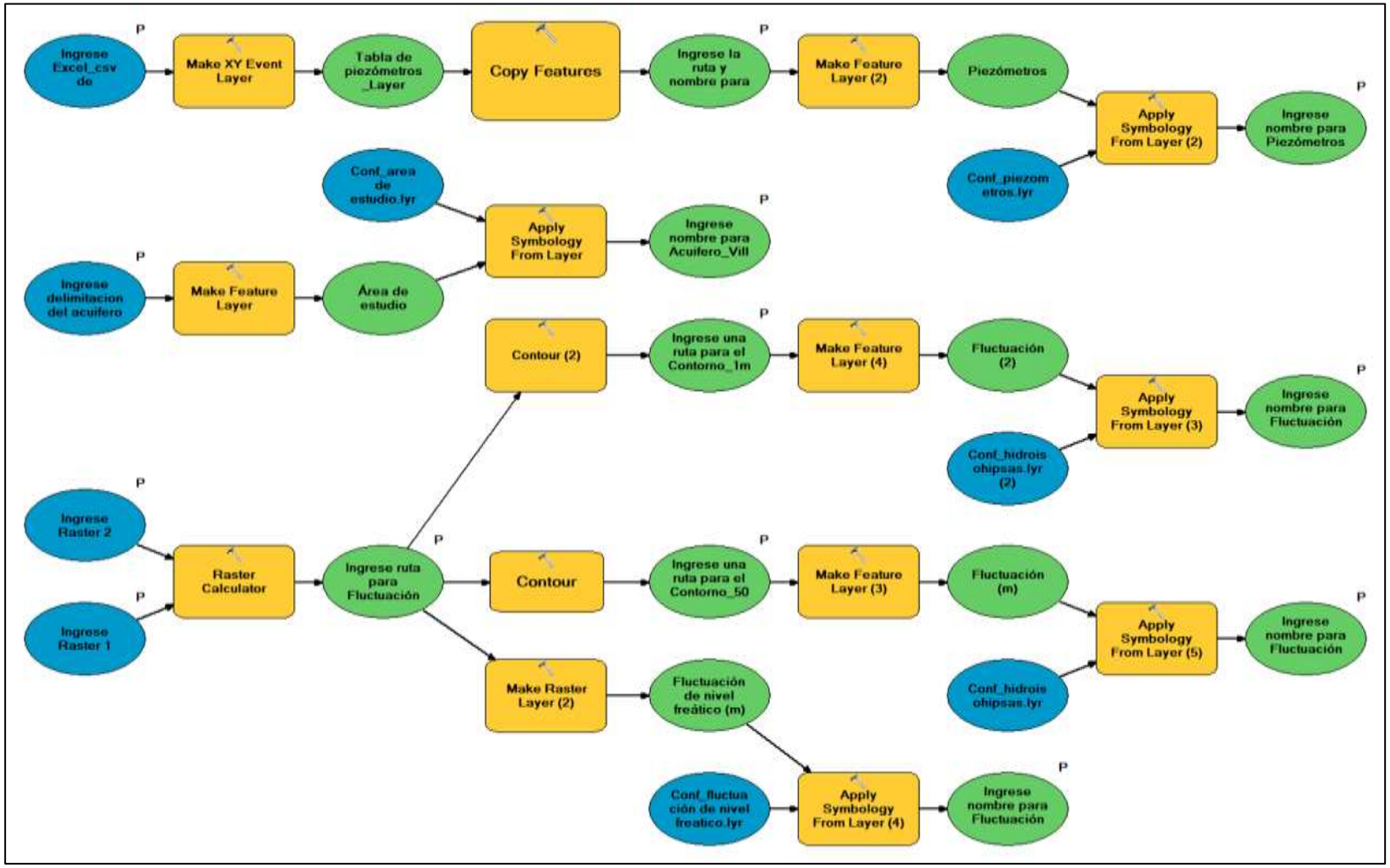


Figura 3 Programación en Model Builder para elaboración de fluctuación de cargas hidráulicas



Los mapas de hidroisohipsas (figuras 4 y 5) como ejemplos del proceso, generados mediante interpolación geoestadística con Model Builder de ArcMap, permitieron caracterizar la distribución espacial de la carga hidráulica en el acuífero Villacurí, así como identificar la configuración del gradiente hidráulico y la dirección del flujo subterráneo. La geometría de las hidroisohipsas mantiene un patrón espacial de recarga desde zonas de alta carga (noreste y sureste) hacia zonas de baja carga (noroeste). Las zonas de recarga se caracterizan por condiciones que facilitan la infiltración de agua hacia el nivel freático, incluyendo la conductividad hidráulica de las rocas y su ubicación en áreas elevadas **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

La configuración de las curvas equipotenciales permite identificar zonas de mayor gradiente hidráulico, evidenciado por la cercanía entre las curvas, que indica sectores donde el flujo subterráneo presenta mayor dinámica. El gradiente hidráulico es el impulso principal que mueve el agua subterránea a través del acuífero **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Por el contrario, en zonas con mayor espaciamiento entre curvas el gradiente hidráulico es menor, lo que indica condiciones de flujo más estables.

Figura 4 Cargas Hidráulicas, periodo abril 2020

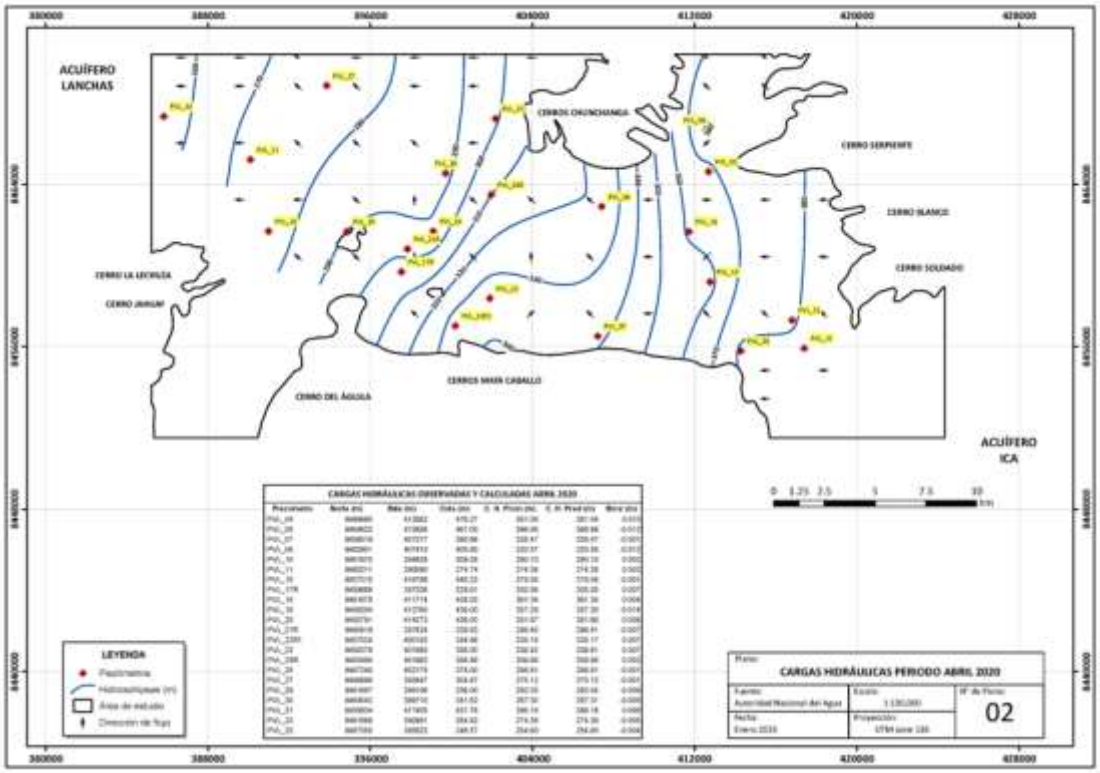
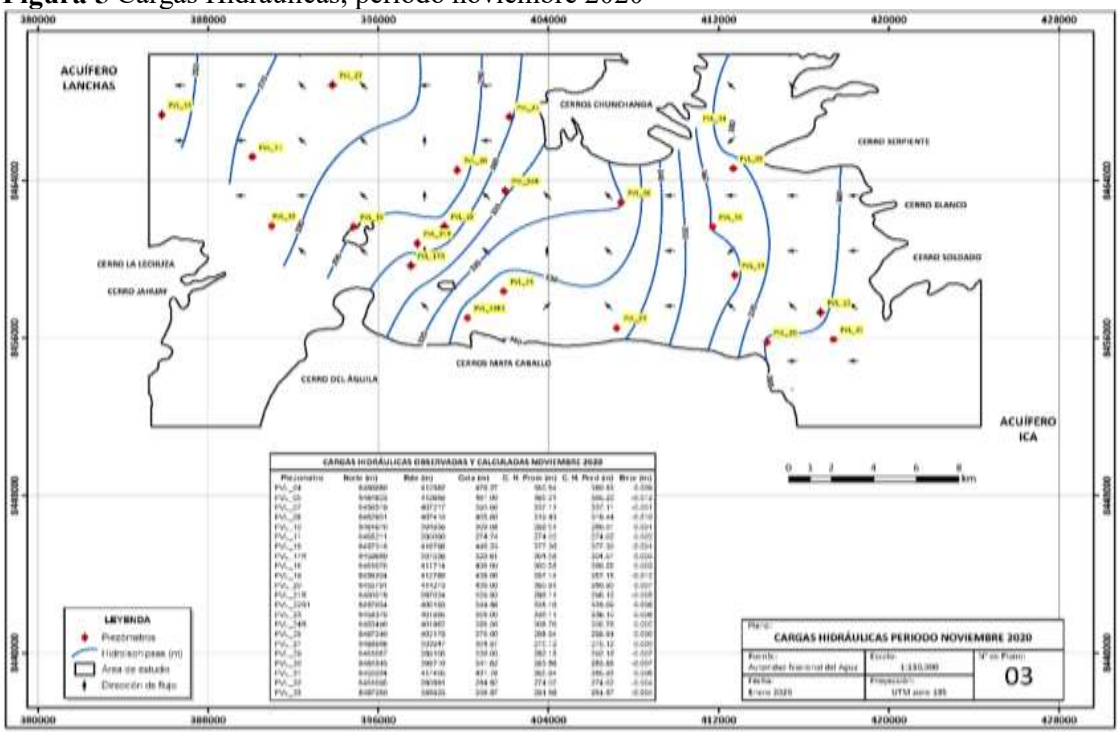


Figura 5 Cargas Hidráulicas, periodo noviembre 2020



Los mapas de fluctuación (Figura 6 y 7), muestran la fluctuación de cargas hidráulicas donde se indica que, en los períodos evaluados, existe una predominancia de descensos del nivel freático en el acuífero, registrándose variaciones negativas en la mayoría de los piezómetros evaluados con rangos que alcanzan aproximadamente hasta los -9 m en algunos sectores con relación al año anterior. Este comportamiento podría estar asociado principalmente a la explotación del acuífero mediante pozos de bombeo y a la presión sobre el recurso hídrico subterráneo. Estudios previos en cuencas similares han reportado tendencias de descenso pronunciadas durante meses de verano y otoño, atribuibles a la extracción intensiva del recurso **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Los ascensos del nivel freático son menos frecuentes y presentan una distribución espacial más localizada y de menor magnitud, sugiriendo que los procesos de recarga natural presentan menor influencia frente a los procesos de extracción. Según Alley 0, la recarga difusa proveniente de la precipitación puede verse reducida en regiones áridas, y las actividades humanas pueden alterar las tasas naturales de recarga y descarga de agua subterránea. Estas variaciones positivas podrían estar asociadas a eventos puntuales de recarga lateral o a la variabilidad natural del sistema acuífero, aspecto que ha sido documentado mediante la comparación de métodos de estimación de recarga en cuencas con

características similares **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Figura 6 Fluctuación de Cargas Hidráulicas (abril 2021-2020)

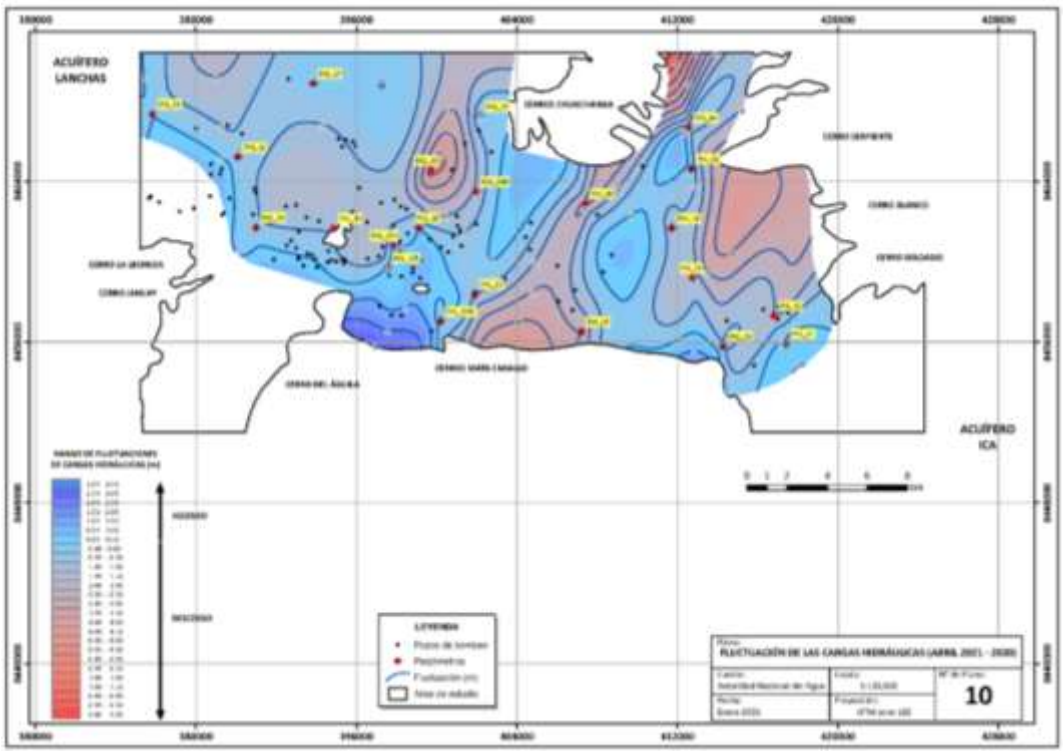
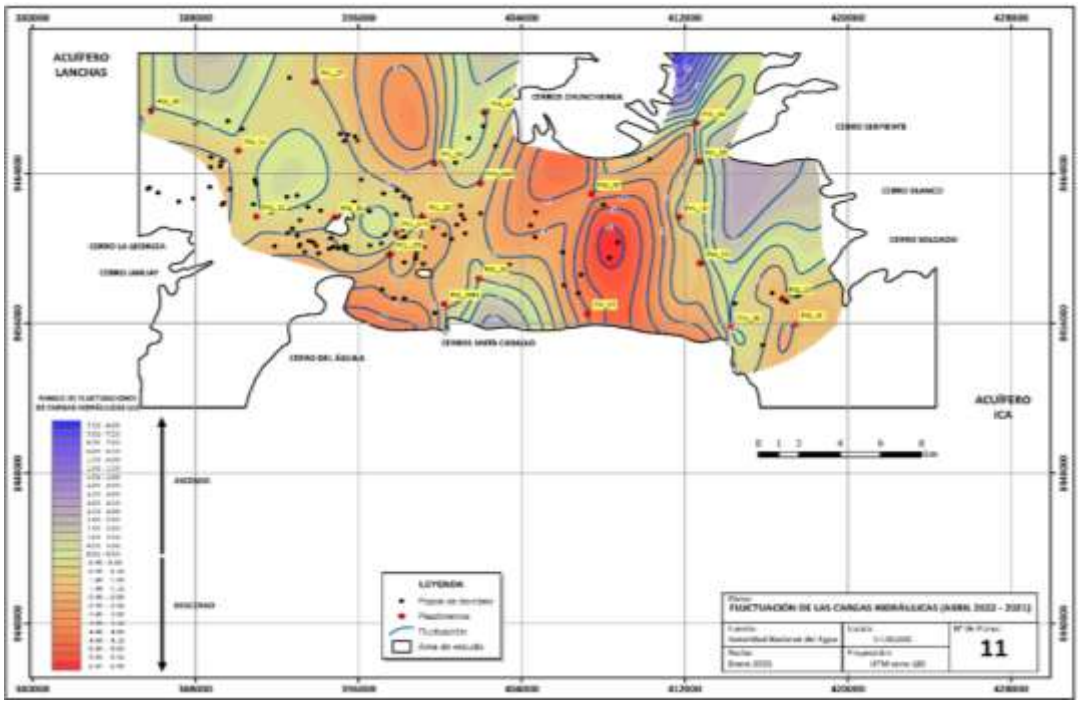


Figura 7 Fluctuación de Cargas Hidráulicas (abril 2022-2021)



CONCLUSIONES

A partir del análisis integrado de datos piezométricos, pruebas estadísticas y herramientas geoespaciales, se concluye lo siguiente:

Intervalo óptimo de monitoreo: El registro mensual del nivel freático constituye el periodo más adecuado para el acuífero Villacurí, ya que captura variaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) y con relevancia hidráulica ($\Delta h \geq 0.05$ m), a diferencia de los intervalos diario y semanal, que producen información redundante y ruido local. Esta frecuencia optimiza el uso de recursos de almacenamiento, procesamiento y personal técnico.

Comportamiento hidrodinámico del acuífero: El análisis espacial evidencia un flujo subterráneo regional con dirección preferencial noreste noroeste, y un gradiente hidráulico relativamente constante en el tiempo. Sin embargo, la tendencia generalizada al descenso del nivel freático (–9 m en algunos sectores) alerta sobre un déficit de recarga frente a la extracción, lo que exige medidas de control y posible veda en zonas críticas.

Ventajas de la automatización: La implementación de flujos de trabajo en Model Builder ha demostrado ser una estrategia eficaz para estandarizar y agilizar la generación de mapas hidrogeológicos, garantizando la reproducibilidad de los análisis y facilitando la actualización periódica de la información, lo cual es clave para la toma de decisiones en la gestión del agua.

Limitaciones y recomendaciones: El estudio se basa en 22 piezómetros, lo que limita la resolución espacial del modelo de interpolación. Se recomienda ampliar la red de monitoreo, especialmente en zonas de recarga y en áreas con alta densidad de bombeo. Asimismo, se sugiere actualizar los mapas anualmente e incorporar modelos de balance hídrico que integren datos de extracción y precipitación, con el fin de anticipar escenarios de estrés hídrico y diseñar estrategias de adaptación frente al cambio climático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alley, W. (2009). Ground water. Encyclopedia of Inland Waters, 684–690. https://doi.org/10.1016/b9780123706263.000156

Alperin, M. (2013). Introducción al análisis estadístico de datos geológicos (1.ª ed.). Universidad Nacional de La Plata.

Anand, B., Karunanidhi, D., Subramani, T., et al. (2020). Longterm trend detection and spatiotemporal analysis of groundwater levels using GIS techniques in Lower Bhavani River basin, Tamil Nadu, India. Environment, Development and Sustainability, 22, 2779–2800. https://doi.org/10.1007/s10668019003183

Autoridad Nacional del Agua. (2018). Evaluación de la veda de los acuíferos Villacurí y Lanchas. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.

Babunski, D., Zaev, E., Tuneski, A., & Bozovic, B. (2018). Métodos de optimización para el sistema SCADA de suministro de agua. Séptima Conferencia Mediterránea sobre Computación Integrada (MECO), Budva, Montenegro, 1–4. https://doi.org/10.1109/MECO.2018.8405970

Barbosa, I. C., Appel Neto, E., Seidel, E. J., & Oliveira, M. S. de. (2017). Proposal of the spatial dependence evaluation from the power semivariogram model. Boletim de Ciências Geodésicas, 23(3), 461–475. https://doi.org/10.1590/S198221702017000300031

Butler, J. J., Jr., Knobbe, S., Reboulet, E. C., Whittemore, D. O., Wilson, B. B., & Bohling, G. C. (2021). Water well hydrographs: An underutilized resource for characterizing subsurface conditions. Ground Water, 59(6), 808–818. https://doi.org/10.1111/gwat.13119

Chandan, K. S., & Yashwant, B. K. (2017). Optimization of groundwater level monitoring network using GISbased geostatistical method and multiparameter analysis: A case study in Wainganga Subbasin, India. Chinese Geographical Science, 27, 201–215. https://doi.org/10.1007/s1176901708599

Chemingui, A., Sulis, M., & Paniconi, C. (2015). An assessment of recharge estimates from stream and well data and from a coupled surfacewater/groundwater model for the des Anglais catchment, Quebec (Canada). Hydrogeology Journal, 23, 1731–1743. https://doi.org/10.1007/s1004001512991

Fernández, R., & Tessone, M. (2015). Geoestadística aplicada a la exploración minera. Parte I: Distribuciones espaciales y variograma. Universidad Nacional de La Plata. https://blogs.ead.unlp.edu.ar/geominas/files/2016/08/geoestadistica1.pdf

Fetter, C. (2018). Properties of aquifers. En Applied Hydrogeology (pp. 66–109). University of Wisconsin OshKosh.

Fletcher, R., & Fortin, M.J. (2018). Spatial dependence and autocorrelation. En Spatial Ecology and Conservation Modeling (pp. 133–168). Springer International Publishing.

García, M., & Fernández, A. (2008). Hidrogeología básica. Las aguas subterráneas y su flujo. Ediciones FIEC.

Hernández, R., Martínez, L., Peñuela, L., & Rivera, S. (2020). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río AyuquilaArmería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio. Investigaciones Geográficas, 101. https://doi.org/10.14350/rig.59892

Hota, T. (2014). Trend surface analysis of spatial data. Gondwana Geological Magazine, 29, 39–44.

Huang, C., Zhang, H., & Robeson, S. M. (2011). On the validity of commonly used covariance and variogram functions on the sphere. Mathematical Geosciences, 43(6), 721–733. https://doi.org/10.1007/s1100401193447

Júnez, H., Hernández, M., Herrera, G., González, J., Cappello, C., Maggio, S., & De Iaco, S. (2023). Évaluation des changements dans les niveaux régionaux des eaux souterraines par krigeage spatiotemporel: application au système aquifère du sud du bassin de Mexico. Hydrogeology Journal, 31(6), 1405–1423. https://doi.org/10.1007/s1004002302681y

Maliva, R. (2016). Aquifer Characterization Techniques. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/9783319321370

Masero Bravo, L. (2020). Una aplicación de interpolación Kriging para el estudio de la evolución de la pandemia Covid19 en España y en la Comunidad Valenciana [Trabajo de fin de grado, Universitat Jaume I]. http://hdl.handle.net/10234/193962

Medina, I., Soler, J., & Giner, J. (2017). Cálculo de escenarios de daños sísmicos en la Comunidad Valenciana utilizando Model Builder (ArcGIS). Sociedad Geológica de España. https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/geo62/geo62_17.pdf

Moreno, J. (2009). Introducción a la geoestadística y su aplicación. Universidad Autónoma de Chapingo.

Muleta, D., & Abate, B. (2021). Groundwater hydrodynamics and sustainability of Addis Ababa city aquifer. Groundwater for Sustainable Development, 12, Article 100485. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100485

Oliver, M., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and Kriging. CATENA, 113, 56–69. https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006

Renard, P., GómezHernández, J. J., Schafmeister, M. T., et al. (2023). Prefacio: Geoestadística e hidrogeología. Hydrogeology Journal, 31, 1383–1386. https://doi.org/10.1007/s10040023026938

Rubin, Y., Chang, C.F., Chen, J., Cucchi, K., Harken, B., Heße, F., & Savoy, H. (2018). Stochastic hydrogeology's biggest hurdles analyzed and its big blind spot. Hydrology and Earth System Sciences, 22(11), 5675–5695. https://doi.org/10.5194/hess2256752018

Sánchez, G., Júnez, H., Alvarez, W., González, J., Bautista, C., & Herrera, G. (2017). Optimización del monitoreo del nivel del agua subterránea para una frecuencia fija. Tecnología y ciencias del agua, 8(5), 19–38. https://doi.org/10.24850/jtyca20170502

Şen, Z. (2015). Water science basic information. En Practical and Applied Hydrogeology (pp. 1–41). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B9780128000755.000017

Tinoco, T., Cotos, J., & Bayona, A. (2018). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de la zona urbana del distrito de Chiquián, utilizando el model builder del ArcGIS. Aporte Santiaguino, 11(2), 263. https://doi.org/10.32911/as.2018.v11.n2.580

Woessner, W., & Poeter, E. P. (2020). Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow. The Groundwater Project. https://doi.org/10.21083/9781777054120