

Efecto del cambio climático sobre la recarga natural de un acuífero: Un caso de estudio en el estado Portuguesa-Venezuela

Effect of climate change conditions on natural aquifer recharge: A case study in Portuguesa state-Venezuela

Romero, Magally^{1*}; Gutiérrez-Ch, José²; Jégat, Hervé¹

¹Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

²E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

*magallyromerom@gmail.com

Resumen

El estado Portuguesa, ubicado en los Llanos Occidentales Venezolanos, es una tierra con diversidad de recursos naturales, entre los que destacan sus reservas de agua subterráneas y suelos agrícolas. Sin embargo, hoy en día el riego a partir de aguas subterráneas suele hacerse sin planificación ni control, lo cual, aunado al posible impacto del cambio climático, podría influir en la recarga natural de los acuíferos y, por ende, en su disponibilidad a largo plazo. Es por ello que, el objetivo de esta investigación es analizar la variación de la recarga natural de un acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa, considerando condiciones de cambio climático. Para realizar esto, en primer lugar, se estimó dicha recarga a partir de datos históricos de precipitación y evaporación usando un modelo hidrológico paramétrico a escala mensual. Luego, se analizó su variación tomando en cuenta condiciones de cambio climático, las cuales se incorporaron a través del modelo climático CNRM-CM5. La selección de dicho modelo se realizó a partir de los coeficientes de correlación generados mediante la comparación del promedio de los datos medidos con el promedio de los datos históricos de los modelos climáticos aprobados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Posteriormente, se aplicó una metodología para reducir la escala de la información ofrecida por el mencionado modelo climático global y generar datos más aproximados a las condiciones del clima del área de estudio. Los resultados obtenidos muestran que, con respecto a la recarga del período histórico, hay una disminución de la recarga natural del acuífero en los períodos futuros. Asimismo, se obtuvo que para una misma trayectoria de concentración representativa (RCP) de gases de efecto invernadero, la recarga disminuye en períodos futuros.

Palabras clave: agua subterránea, modelo hidrológico, cambio climático, río Guache, río Sarare.

Abstract

The Portuguesa state, located in the western Venezuelan plains, is a land with a diversity in natural resources, among which its groundwater reserves and agricultural land stand out. However, today groundwater extraction for irrigation is usually done without planning or control, which, added to the possible impact of climate change, it could affect the natural aquifers recharge and its availability in the long-term. For that reason, this research aimed to analyze the variation of the natural recharge of an aquifer located between the Guache and Sarare rivers in Portuguesa state while considering climate change conditions. To do this, first, the natural aquifer recharge was estimated from the historical precipitation and evaporation data by using a monthly scale parametric hydrological model. Next, the variation of such recharge was analyzed by considering climate change conditions, in which the climate model CNRM-CM5 was incorporated. The selection of such model was made from the correlation coefficients generated by comparing the average of the measured data with the average of the historical data of the climate models approved by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, for its acronym in English). Then, a methodology was applied to reduce the scale of the information offered by the mentioned global climate model and to generate more approximate data to the climate conditions for the study area. Results show that there is a decrease in the future recharge rates with respect to the recharge of the historical period. Likewise, it was determined that for the same representative concentration trajectory (RCP) of greenhouse gases, the future recharge rates will decrease.

Keywords: groundwater, hydrological model, climate change, Guache river, Sarare river.

1 Introducción

El uso y la calidad del agua subterránea está íntimamente vinculado a la salud, medios de vida y seguridad alimentaria de la población humana, así como también, al desarrollo económico y a la prosperidad (Smith y col., 2020). Existen una serie de factores que hacen muy asequible la utilización de agua subterránea, como por ejemplo su amplia distribución geográfica, que habitualmente la sitúa próxima al centro de consumo; su fácil adaptación a la demanda hídrica, ya que puede satisfacer, de un modo rápido y eficaz, excesos puntuales en su demanda; su uniformidad en la calidad química; y su protección ante la agresión de diferentes agentes (Pernía y col., 2009).

En ese sentido, es importante prestar atención a la estimación de la recarga de los acuíferos, ya que es necesario determinar la cantidad de agua que llega a ellos, su calidad, su procedencia y las zonas donde se presenta recarga o descarga del flujo subterráneo. Por este motivo, su cuantificación es un aspecto incluido dentro de estudios referentes a los recursos de agua subterránea, al transporte de contaminantes, a la subsidencia o al diseño de campos de pozos (Isaar y Passchier, 1990 en Vélez y col., 2004). Sin embargo, tal como lo señalan Pernía y Fornés, 2009, en los últimos años, se han acumulado ciertas evidencias de cambio climático y de sus impactos sobre diversos sectores socioeconómicos y sistemas naturales en todo el planeta, que afectan a la disponibilidad de los recursos hídricos y, por tanto, modifican la tasa de escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es analizar la variación de la recarga natural del acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa -Venezuela, considerando condiciones de cambio climático. Para ello, en primer lugar, se estima la recarga natural del acuífero mediante un modelo hidrológico paramétrico a escala mensual. Posteriormente, se analiza el posible efecto del cambio climático en la variación de la recarga natural estimada para el acuífero en estudio. Por último, se estima la recarga natural del acuífero estudiado, mediante el modelo de simulación hidrológica a escala mensual (SIHIM).

2 Marco Conceptual

A continuación se describen algunos aspectos teóricos relacionados a la temática de la investigación. Sin embargo, para más detalle de la definición de términos técnicos mencionados ver el Anexo A.

2.1 Modelos de simulación hidrológica

Debido a la falta de información sobre el recurso agua, los

organismos responsables del desarrollo de las diferentes regiones, se han visto obligados a recurrir a métodos de simulación, que les permitan estimar las disponibilidades de este recurso, para así poder evaluar diferentes alternativas y seleccionar la que mejor se adapte a la región en estudio (Duque y col., 1991).

En ese sentido, Urciuolo y col., 2007, señalan que un modelo hidrológico es una representación simplificada del sistema real cuyo objetivo es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas con las salidas, las cuales pueden expresarse como función del tiempo.

2.1.1 Modelo de simulación hidrológica a escala mensual (SIHIM)

El modelo SIHIM, tal como lo señalan Duque y col., 1991, fue desarrollado para pequeños incrementos de espacio y grandes intervalos de tiempo, intervalos mensuales. Además, en él no se considera la presencia de embalses, de lagos, ni de pantanos, y se considera la cuenca dividida en subcuencas, en las cuales se supone homogeneidad tanto en los procesos hidrológicos como en las condiciones que los afectan.

Los distintos procesos de almacenamiento y transferencia con base al sistema hidrológico regional son formulados matemáticamente y su solución conjunta constituye el modelo de simulación (Duque y col., 1991).

2.2 El cambio climático y el agua

El agua está relacionada con todos los componentes del sistema climático (atmósfera, hidrósfera, criósfera, superficie terrestre y biósfera). Por ello, el cambio climático afecta al agua mediante diversos mecanismos (Bates y col., 2008).

De acuerdo con Bates y col., 2008, el calentamiento climático observado en los últimos decenios está coherentemente asociado a las variaciones de ciertos componentes del ciclo hidrológico y de los sistemas hidrológicos: cambios en las pautas, intensidades y valores extremos de precipitación; fusión generalizada de la nieve y del hielo; aumento del vapor de agua atmosférico; aumento de la evaporación; y variaciones de la humedad del suelo y de la escorrentía.

Hasta el momento, la atribución de las variaciones de la precipitación mundial es incierta, puesto que la precipitación está fuertemente influida por las pautas de variabilidad natural en gran escala. Por otro lado, los niveles subterráneos de numerosos acuíferos del mundo han experimentado una tendencia decreciente durante los últimos decenios, aunque ello se debe, por lo general, al bombeo de agua subterránea a un mayor ritmo que la recarga, y no a una disminución freática

relacionada con el clima (Bates y col., 2008).

Bates y col., 2008, también señalan que, las incertidumbres respecto a los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos se derivan principalmente de la incertidumbre existente respecto a los aportes de precipitación y, en menor medida, de las incertidumbres respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero, o respecto a las sensibilidades climáticas, o de la sensibilidad inherente a los propios modelos hidrológicos.

2.3 Modelos climáticos globales

Un modelo climático consiste en una representación matemática de los procesos que tienen lugar en el sistema climático, cuyo estado define el clima. El sistema climático se considera compuesto por cinco componentes: atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera (Peixoto y Oort, 1992 en Gaertner y col., 2012). Entre ellos se producen grandes intercambios de materia, calor y momento y constantes interacciones mediante multitud de procesos físicos, químicos y biológicos, lo que hace que el sistema climático terrestre sea muy complejo (Gaertner y col., 2012).

Los modelos globales de clima constituyen actualmente la herramienta básica de que se dispone para estudiar los procesos que conforman el estado del clima. Por esta razón, resultan imprescindibles para derivar la respuesta del clima a las perturbaciones inducidas por actividades humanas. Actualmente la mayor parte de los modelos climáticos globales incluyen alguna representación de los cinco componentes del sistema climático, de los procesos que se producen en cada uno de ellos y de los que determinan los intercambios mutuos (Gaertner y col., 2012).

Según Oviedo y col., 2010, de las modelaciones del clima futuro se espera conocer los cambios climáticos de la Tierra en los próximos años de acuerdo a las posibles emisiones de gases de efecto invernadero y su influencia en el clima, que se manifiestan en cambios en los patrones climáticos, modificaciones en las condiciones meteorológicas, en la cobertura vegetal, la oferta del recurso hídrico, los pisos térmicos, el nivel del mar y la oferta agrícola y pecuaria. Esta información es el principal recurso para tomar medidas de adaptabilidad con el fin de responder adecuadamente a los posibles cambios futuros.

2.4 Escenarios de cambio climático regionales

Un escenario de cambio climático es una descripción coherente, internamente consistente y plausible de una evolución futura posible del clima (Gaertner y col., 2012).

Tal como lo señalan Gaertner y col., 2012, en el caso del

cambio climático antropogénico, relacionado con la creciente acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEIs), la evolución futura de la concentración de GEIs dependerá de muchos factores económicos y sociales cuyo desarrollo no se puede conocer con antelación, como el crecimiento económico, las innovaciones tecnológicas o la demografía. Por ello, se han desarrollado los escenarios de emisiones, derivados de un ejercicio de prospectiva sobre las evoluciones futuras de emisiones antropogénicas de GEIs y aerosoles. Esto se realiza considerando diversos supuestos acerca del futuro desarrollo demográfico y socio-económico en el mundo.

Partiendo de estas hipótesis, se deducen las emisiones de GEIs y las concentraciones resultantes, que sirven de forzamiento radiativo para los modelos climáticos globales. No obstante, el procedimiento para obtener escenarios de emisiones se ha modificado recientemente por otro en el que se parte de ciertas trayectorias futuras posibles de forzamiento radiativo (el cambio en el balance entre la radiación saliente y entrante en la atmósfera, causado por cambios en la concentración de GEIs y aerosoles). A estos valores de forzamiento radiativo se puede llegar a través de diferentes evoluciones socio-económicas y tecnológicas. Para forzar los modelos climáticos se escoge una de las evoluciones de concentraciones de GEIs que puede dar lugar a las trayectorias de forzamiento radiativo consideradas. Dichas evoluciones de GEIs constituyen los denominados escenarios RCP, del inglés "*Representative Concentration Pathways*" (Gaertner y col., 2012).

Por otro lado, Gaertner y col., 2012, señalan que para obtener proyecciones del cambio climático debido al incremento en la atmósfera de gases de efecto invernadero y de aerosoles emitidos por actividades humanas, se utilizan modelos climáticos globales. Sin embargo, debido a la limitada resolución espacial de los modelos globales, y a la necesidad de disponer de información a escala regional y local para estudios de impactos del cambio climático, se realiza la denominada regionalización (*downscaling*, en inglés) para aumentar la resolución espacial de los escenarios climáticos.

3 Metodología

3.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio tiene una superficie total de 2427.096 km² aproximadamente, y se encuentra ubicada en los Llanos Occidentales Venezolanos del estado Portuguesa, entre los ríos Guache y Sarare (ver la Figura 1).

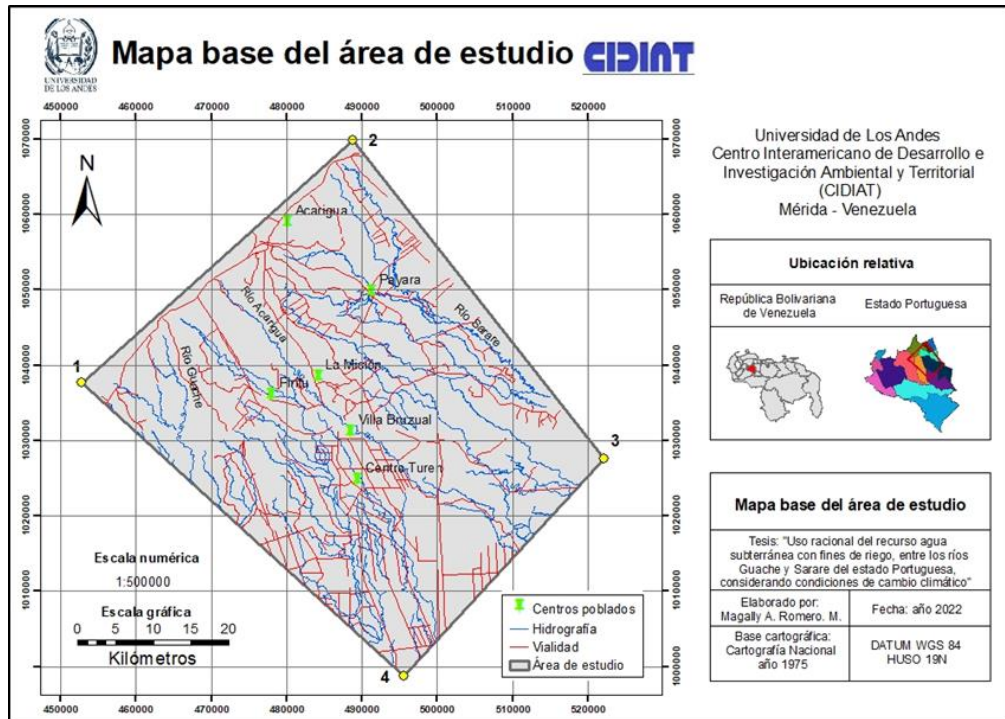


Fig. 1. Ubicación del área de estudio (Romero y col., 2022).

3.2 Estimación de la recarga natural del acuífero

En la Figura 2 se presenta la metodología para estimar la recarga natural del acuífero estudiado. A continuación, se describen cada una de las etapas.

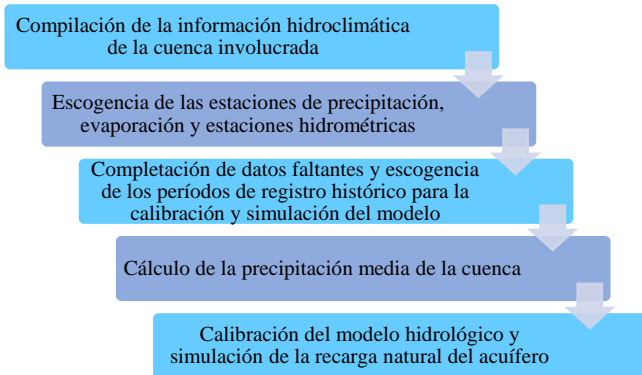


Fig. 2. Metodología para estimar la recarga natural del acuífero estudiado.

i) **Compilación de la información hidroclimática de la cuenca involucrada:** se seleccionó la cuenca del río Acarigua para la estimación de la recarga natural del acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare; su escogencia se basa en que la misma disponía de información confiable de la estación hidrométrica del río Acarigua en Puente Acarigua.

ii) **Escogencia de las estaciones de precipitación, evapora-**

ción y estaciones hidrométricas: se tomaron en cuenta aquellas estaciones ubicadas dentro o en las cercanías de la cuenca del río Acarigua. Luego, se aplicó la metodología de los Polígonos de Thiessen para estimar el área de influencia de cada estación, descartando aquellas estaciones que no ejercían influencia en la cuenca estudiada. Se consideraron aquellas que tuvieran más de 10 años de registros continuos y con el mismo período de años con información. Igualmente, se consideró la calidad de los datos (porcentajes bajos de datos faltantes y englobados). De este proceso de selección, resultaron 8 estaciones de precipitación con información confiable para la calibración y simulación de la recarga al acuífero en estudio (ver la Tabla 1).

Tabla 1. Estaciones de precipitación seleccionadas para estimar la recarga.

Estaciones de precipitación seleccionadas	
Estación	Serial
Hacienda Camburito	2246
Capilla Bucaral	2226
Parque Yacambú	2232
Paso Angostura	2227
Miracuy	2219
Caspito	2231
Las Delicias	2288
La Cruz	2233

Asimismo, para la selección de los datos de evaporación se tomaron en cuenta los mismos criterios que se usaron para la selección de las estaciones de precipitación; siendo elegida la estación de evaporación “Paso Angostura” (serial 2227) tanto para la fase de calibración como para la fase de modelación.

Por su parte, la localización y elección de las estaciones hidrométricas se realizó a partir de la base de datos hidroclimáticos del antiguo Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, datos que hoy pertenecen al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), quedando seleccionada la estación hidrométrica Acarigua en Puente Acarigua, cuya información se utilizó para la calibración del modelo SIHIM, empleado en este trabajo.

iii) Completación de los datos faltantes y escogencia de los períodos de registro histórico para la calibración y simulación del modelo: para la estimación y completación de datos faltantes en las estaciones seleccionadas, se utilizó la metodología aplicada por Vásquez, 2019, en la cual se lleva a cabo una correlación lineal mes a mes entre las estaciones escogidas con sus respectivos promedios, creando una estación “ficticia” que corresponde a la correlación de los promedios. Posteriormente, se compara la estación con datos faltantes con cada una de las estaciones restantes, incluyendo la estación “ficticia”, y se evalúa con cual existe mayor correlación, y que adicionalmente, tenga suficientes datos para completar el o los datos faltantes.

En relación a la selección de los períodos de registro histórico para la calibración y simulación del modelo se seleccionó el período comprendido desde el año 1975 hasta el año 1987, para la calibración del modelo SIHIM en la cuenca del río Acarigua; mientras que para la fase de simulación se trabajó con el período de años que va desde 1975 hasta 1997.

iv) Cálculo de la precipitación media de la cuenca: la precipitación media de la cuenca se obtuvo como el promedio de los valores medios obtenidos a través de los métodos de isoyetas y polígonos de Thiessen. Luego que se determinó la precipitación media por ambos métodos (con un factor de ajuste de 0.993), se obtuvo una precipitación promedio en la cuenca del río Acarigua de 2094.75 mm.

v) Calibración del modelo hidrológico y simulación de la recarga natural: se consideró la cuenca del río Acarigua para la calibración del modelo SIHIM, y se tomó como punto de control la estación hidrométrica de Acarigua en Puente Acarigua (serial 0005), ya que esta disponía de registros hidrométricos que coincidían con los registros climáticos. Los datos utilizados para la calibración de la cuenca en dicha estación hidrométrica van desde el año 1975 hasta el año 1987, para un total de 13 años de registro. Se utilizaron 8 estaciones de precipitación y 1 estación de evaporación con igual período de información. Es de notar que, tanto para la fase de calibración como para la fase de simulación se usó una

versión modificada del programa SIHIM, ya que esta mostraba los resultados del flujo subterráneo efluente directamente en el archivo de salida.

En esta fase de calibración, se tomó en cuenta la información del manual del usuario del modelo SIHIM, corregido por Duque y col., 1991, para estimar los valores iniciales de los parámetros de entrada, los cuales se fueron variando hasta que existiera poca diferencia entre los los datos medidos y los generados por el modelo, y un buen coeficiente de correlación.

Por su parte, el período utilizado para la modelación fue desde 1975 hasta 1997, para un total de 23 años de registros históricos. Las estaciones de precipitación y evapoación, así como sus respectivos porcentajes de influencia fueron los mismos usados en la fase de calibración del modelo. Los parámetros de entrada utilizados fueron los obtenidos en la calibración.

3.3 Influencia del cambio climático en la variación de la recarga natural estimada

Para analizar la variación de la recarga natural del acuífero estudiado tomando en cuenta condiciones de cambio climático, se utilizó la información (obtenida a través de las páginas de *WordClim* y *Climate Explorer*) correspondiente a la fase 5 del Proyecto de Intercomparación de modelos de clima acoplados, CMIP5, empleada por el IPCC en su quinto informe de evaluación. Es de notar que, se tomó como guía la metodología desarrollada por Vásquez, 2019, para la selección del modelo climático y posterior reducción de escala de los datos. En ese sentido, para el caso del presente estudio los pasos para analizar el posible efecto del cambio climático en la variación de la recarga mencionada se pueden sintetizar como (ver la Figura 3):

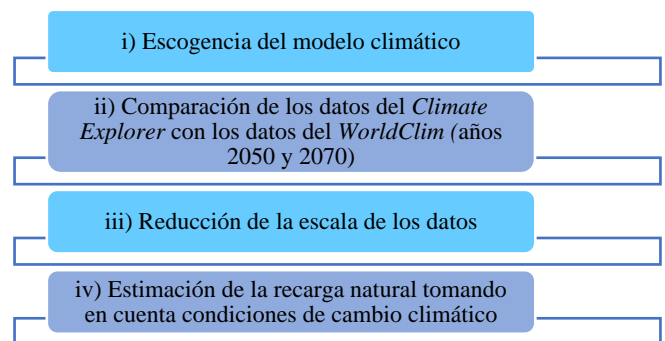


Fig. 3. Esquema de la metodología para analizar la influencia del cambio climático en la variación de la recarga natural estimada.

i) Escogencia del modelo climático: para seleccionar el modelo climático con el cual se trabajaría se aplicó la metodología desarrollada por Vásquez, 2019, la cual consiste en realizar una comparación entre los datos históricos de 19 modelos climáticos de circulación global, correspondientes

al CMIP5, y los datos observados del área de estudio; para visualizar cuál de los modelos climáticos representaba mejor los datos medidos. Los datos de los modelos climáticos se obtuvieron mediante la página del *Climate Explorer*, para lo cual se definió un período de años en común entre los modelos climáticos y los datos medidos y una cuadrícula en la que se generarían los datos de precipitación del área de estudio, que en este caso tuvo como coordenadas (en grados decimales) Norte 9.4° a 10° y Este -69.8° a -69.1°, englobando la zona donde se encontraban las estaciones de precipitación.

Luego, se calculó el coeficiente de correlación entre el promedio de los datos históricos medidos y los datos históricos de los modelos climáticos usados. El modelo CNRM-CM5 con un coeficiente de correlación de 0.75 fue el modelo escogido como el modelo que mejor representaba el comportamiento de los datos observados en el área de estudio; por ende fue el modelo usado para generar la serie de datos para los períodos 1998-2022; 2023-2060 y 2061-2080.

ii) Comparación de los datos obtenidos en la página del *Climate Explorer* con los datos obtenidos en la página *WorldClim* para los años 2050 y 2070: para llevar a cabo las distintas modelaciones hechas en este trabajo, tomando en cuenta condiciones de cambio climático, se consideraron dos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero; un escenario intermedio con un RCP de 4.5 y otro escenario más desfavorable con un RCP de 8.5. Sin embargo, antes de realizar dichas modelaciones se hizo una comparación entre los datos obtenidos con la página del *Climate Explorer* y los datos obtenidos mediante la página del *WorldClim* para los años 2050 y 2070 (tanto para el RCP 4.5 como para el RCP 8.5 del modelo CNRM-CM5); esto para validar el uso de los datos de la página del *Climate Explorer*.

Para realizar dicha comparación se extrajeron (mediante el programa ArcGis 10.1) los datos de precipitación, obtenidos con el *WorldClim* para el año 2050 y 2070 (ya que la página sólo proporciona información para esos dos años), en las coordenadas de las estaciones climáticas usadas en este estudio; luego se determinó el promedio de dichos datos y se

comparó con los datos obtenidos en el *Climate Explorer* para los años 2050 y 2070, dentro la cuadrícula definida previamente para el área de estudio. Una vez realizada la comparación de las series de datos del *WorldClim* y las series de datos del *Climate Explorer* para los años y los escenarios mencionados, se pudo visualizar que, en general, las mismas tienen tendencias similares con coeficientes de correlación relativamente altos, validando así la utilización de los datos generados por el *Climate Explorer* para las distintas modelaciones.

iii) Reducción de la escala de los datos: de forma general, los resultados de los modelos climáticos globales tienen una resolución muy baja, lo cual limita su aplicabilidad en estudios relacionados con el impacto del cambio climático. Por ello, resulta necesario emplear métodos para reducir la escala de los datos proporcionados por dichos modelos y así incrementar la resolución espacial de las variables climáticas. En esta investigación, para reducir la escala de los datos de precipitación obtenidos mediante el *Climate Explorer* se utilizó la metodología desarrollada por Vásquez, 2019, la cual radicó en calcular un factor multiplicador que relaciona mes a mes cada estación con el promedio del modelo climático de circulación empleado, que para efectos de este trabajo fue el modelo CNRM-CM5. Es importante señalar que, este proceso de reducción de escala se realizó (i) con base a los datos históricos; y (ii) con base a los datos futuros.

En ese sentido, para la reducción de escala con base a los datos históricos, en primer lugar, se consideró un período común tanto para las estaciones de precipitación utilizadas como para los datos del modelo CNRM-CM5 generados con el *Climate Explorer*, en este caso dicho período va desde el año 1975 hasta el año 1997. Luego, se determinó el promedio mensual para todos esos años y se dividió el promedio de cada mes de cada estación entre el promedio mensual calculado para el modelo CNRM-CM5, para los 23 años de registro mencionados; obteniéndose así los factores multiplicadores que servirían para estimar la recarga del acuífero estudiado en el período 1998-2022 mediante el programa SIHIM (ver la Tabla 2).

Tabla 2. Factores multiplicadores para el período 1998-2022 del modelo CNRM-CM5 (Romero, 2023).

Factores multiplicadores obtenidos para el período 1998-2022 del modelo CNRM-CM5

Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Enero	0.762	0.955	2.039	1.450	1.862	2.302	1.306	2.554
Febrero	3.658	5.489	10.769	9.090	9.251	9.123	6.376	11.085
Marzo	5.366	4.981	9.239	8.462	7.039	7.259	6.197	9.655
Abril	4.169	4.277	5.254	5.455	5.728	4.784	5.372	6.219
Mayo	2.575	2.260	2.843	2.613	2.697	2.139	2.764	2.915
Junio	2.845	2.449	2.999	2.507	2.932	2.196	3.411	3.471
Julio	2.390	2.011	2.634	2.091	2.469	1.822	2.891	2.956

Factores multiplicadores obtenidos para el período 1998-2022 del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Agosto	2.121	1.870	1.910	1.861	2.165	1.509	2.622	2.250
Septiembre	1.923	1.837	1.695	1.946	2.056	1.463	2.581	2.076
Octubre	2.002	1.727	1.765	1.729	1.976	1.399	1.997	1.648
Noviembre	1.846	1.699	2.012	2.085	2.377	1.670	2.170	2.349
Diciembre	2.653	2.585	4.046	3.145	3.555	2.714	3.688	5.090

Por su parte, para la reducción de escala con base a los datos futuros se tomaron en cuenta los datos del *WorldClim* de cada estación para los años 2050 y 2070, y para los RCP 4.5 y 8.5 en cada caso. Igualmente, se consideraron los datos del *Climate Explorer* obtenidos para el modelo CNRM-CM5 en los períodos 2041-2060 y 2061-2080 y se determinó el promedio mensual para ambos períodos. Posteriormente, se dividieron los datos del *WorldClim* de cada mes de cada estación entre

el promedio mensual calculado, con los datos del *Climate Explorer*, para los mencionados períodos del modelo CNRM-CM5. Obteniendo de esa manera los factores multiplicadores que permitirían calcular los datos de precipitación de cada estación y estimar la recarga del acuífero con el programa SIHIM para los períodos 2023-2060 y 2061-2080 (ver las Tablas 3 - 6).

Tabla 3. Factores multiplicadores para el período 2023-2060 (RCP 4.5) del modelo CNRM-CM5 (Romero, 2023).

Factores multiplicadores obtenidos para el período 2023-2060 (RCP 4.5) del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Enero	1.185	1.481	3.851	2.222	3.258	3.258	2.962	3.110
Febrero	1.986	1.986	4.369	3.177	3.972	4.170	3.177	3.376
Marzo	1.840	1.380	2.530	1.725	2.530	2.760	1.840	2.070
Abril	2.190	1.706	2.374	1.890	2.443	2.213	2.512	2.120
Mayo	1.650	1.221	1.287	1.295	1.444	1.196	1.840	1.337
Junio	1.861	1.095	1.325	1.318	1.683	1.288	1.928	1.392
Julio	1.717	1.170	1.236	1.286	1.584	1.194	1.850	1.327
Agosto	1.507	0.938	0.862	1.021	1.172	0.921	1.407	0.996
Septiembre	1.215	0.657	0.757	0.699	0.832	0.666	1.073	0.765
Octubre	1.362	0.819	0.886	0.911	0.969	0.852	1.128	0.886
Noviembre	1.270	1.063	1.339	1.270	1.477	1.367	1.546	1.367
Diciembre	1.478	1.833	2.365	2.188	2.424	2.365	2.543	2.247

Tabla 4. Factores multiplicadores para el período 2023-2060 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5 (Romero, 2023).

Factores multiplicadores obtenidos para el período 2023-2060 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Enero	1.112	1.359	3.459	1.977	2.965	2.842	2.595	2.718
Febrero	2.094	2.094	4.450	3.141	4.188	4.188	3.141	3.403
Marzo	2.796	1.957	3.915	2.796	4.194	4.474	2.796	3.355
Abril	2.282	1.778	2.498	1.970	2.570	2.330	2.618	2.234
Mayo	1.668	1.244	1.318	1.327	1.483	1.225	1.852	1.354

Factores multiplicadores obtenidos para el período 2023-2060 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Junio	1.892	1.120	1.341	1.333	1.687	1.285	1.987	1.419
Julio	1.681	1.139	1.209	1.255	1.549	1.170	1.797	1.294
Agosto	1.545	0.976	0.891	1.052	1.205	0.942	1.451	1.027
Septiembre	1.237	0.665	0.776	0.725	0.862	0.691	1.092	0.785
Octubre	1.350	0.809	0.881	0.906	0.962	0.849	1.116	0.881
Noviembre	1.284	1.065	1.352	1.284	1.489	1.380	1.571	1.380
Diciembre	1.359	1.687	2.156	1.968	2.250	2.156	2.390	2.062

Tabla 5. Factores multiplicadores obtenidos para el período 2061-2080 (RCP 4.5) del modelo CNRM-CM5 (Romero, 2023).

Factores multiplicadores obtenidos para el período 2061-2080 (RCP 4.5) del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Enero	1.287	1.501	3.646	2.145	3.217	3.003	2.788	3.003
Febrero	2.136	2.136	4.273	3.205	4.006	4.273	3.205	3.472
Marzo	1.898	1.424	2.848	1.898	2.848	3.006	1.898	2.215
Abril	2.252	1.770	2.542	1.995	2.606	2.381	2.574	2.220
Mayo	1.665	1.235	1.321	1.330	1.493	1.244	1.828	1.359
Junio	1.917	1.133	1.366	1.358	1.723	1.319	2.002	1.443
Julio	1.684	1.141	1.204	1.259	1.542	1.172	1.809	1.290
Agosto	1.520	0.955	0.872	1.030	1.179	0.922	1.420	1.005
Septiembre	1.196	0.644	0.744	0.694	0.828	0.652	1.045	0.753
Octubre	1.417	0.856	0.939	0.966	1.031	0.911	1.178	0.939
Noviembre	1.356	1.135	1.435	1.356	1.577	1.451	1.656	1.451
Diciembre	1.448	1.748	2.247	2.097	2.347	2.247	2.497	2.147

Tabla 6. Factores multiplicadores obtenidos para el período 2061-2080 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5 (Romero, 2023).

Factores multiplicadores obtenidos para el período 2061-2080 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Enero	1.167	1.334	3.502	2.001	3.002	2.835	2.668	2.668
Febrero	2.611	2.611	5.221	3.730	4.848	4.848	3.730	4.102
Marzo	1.922	1.538	2.883	1.922	2.883	3.268	1.922	2.307
Abril	2.194	1.679	2.383	1.896	2.465	2.248	2.492	2.113
Mayo	1.661	1.229	1.314	1.323	1.483	1.239	1.830	1.351
Junio	1.871	1.105	1.315	1.308	1.661	1.270	1.954	1.398
Julio	1.703	1.160	1.219	1.271	1.569	1.182	1.829	1.309
Agosto	1.541	0.975	0.883	1.050	1.200	0.933	1.450	1.025
Septiembre	1.223	0.659	0.761	0.710	0.847	0.676	1.078	0.779
Octubre	1.353	0.808	0.883	0.907	0.965	0.850	1.114	0.874

Factores multiplicadores obtenidos para el período 2061-2080 (RCP 8.5) del modelo CNRM-CM5								
Meses / Estaciones	Hacienda Camburito	Capilla Bucaral	Parque Yacambú	Paso Angostura	Miracuy	Caspito	Las Delicias	La Cruz
Noviembre	1.290	1.075	1.347	1.275	1.490	1.376	1.576	1.376
Diciembre	1.410	1.749	2.257	2.087	2.313	2.257	2.426	2.144

iv) Estimación de la recarga natural tomando en cuenta condiciones de cambio climático: una vez aplicado el proceso de reducción de escala de los datos del modelo climático CNRM-CM5; con los valores de precipitación y evaporación obtenidos para todas las estaciones con las cuales se trabajó, junto con los períodos de tiempo establecidos para realizar las simulaciones respectivas (1998-2022; 2023-2060 y 2061-2080) y las rutas de concentración representativas consideradas (RCP 4.5 y RCP 8.5), se estimó la recarga natural al acuífero estudiado mediante el programa SIHIM.

4 Discusión y Resultados

En la Tabla 7 se muestra la recarga natural estimada del acuífero ubicado entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa, luego de aplicar la metodología descrita en la sección 3. En particular, para el período histórico y los períodos futuros, incorporando el posible efecto del cambio climático.

Tabla 7. Recarga natural estimada al acuífero, considerando condiciones de cambio climático.

Recarga natural estimada al acuífero				
Descripción	Período	RCP	Recarga (Mm ³)	Recarga (m ³ /s)
Datos históricos	1998-2022	4.5	1229.94	1.56
		8.5	1165.75	0.97
Datos Futuros	2023-2060	4.5	1270.77	1.06
		8.5	607.31	0.96
	2061-2080	4.5	631.51	1.00
		8.5	631.51	1.00

Como puede observarse, los resultados proyectan una disminución de la recarga natural en los períodos futuros con respecto a la recarga estimada para el período histórico. En efecto, para el período histórico 1998-2022 se estima una lámina de recarga anual de 55.9 mm, mientras que para el período futuro 2023-2060 con RCP 4.5 se proyecta una lámina de recarga anual de 34.8 mm, y para el período 2061-2080 considerando también un RCP 4.5 se estima una lámina anual de recarga de 34.5 mm; teniendo una disminución de 37.6 % (21.1 mm) en el período 2023-2060 y de 38.3 % (21.4 mm) en el período 2061-2080 (RCP 4.5) con respecto al mencionado período histórico.

En relación al período futuro 2023-2060 con RCP 8.5 la lámina anual de recarga estimada es de 38 mm aproximadamente, mientras que para el período 2061-2080 con RCP 8.5 se estima una lámina anual de 35.9 mm aproximadamente. Lo cual, muestra que aunque la recarga disminuye, considerando un RCP 8.5, para ambos períodos con respecto al período histórico (1998-2022) en un 32% (17.9 mm) y 35.8 % (20 mm) respectivamente; dicha recarga es mayor con respecto a la recarga estimada para los mismos períodos (2023-2060 y 2061-2080) pero con un RCP de 4.5 (ver la Figura 4). No obstante, para los escenarios con RCP 8.5 hubo un aumento de la lámina de precipitación en las simulaciones de esos períodos por lo cual es de esperar que la recarga también aumente.

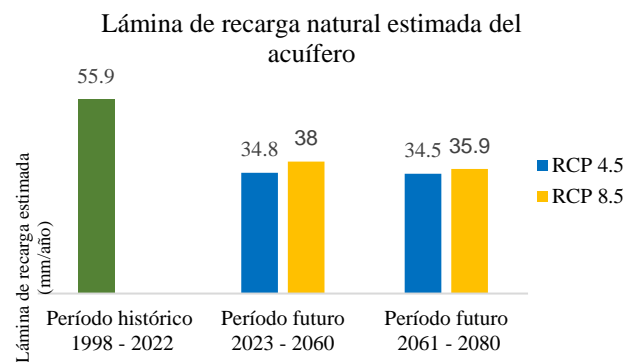


Fig. 4. Gráfico de la lámina de recarga anual estimada para los distintos períodos tomando en cuenta condiciones de cambio climático (Romero y col., 2022).

Finalmente, es importante señalar que para efectos de esta investigación la calibración del modelo SIHIM presenta un error porcentual de 38% mientras que la diferencia en porcentaje de la recarga obtenida entre los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 es de 5.6 % para el período futuro 2023 – 2060 y de 2.5 % para el período futuro 2061 – 2080; siendo estas diferencias bastante menores con respecto al error porcentual de la calibración por lo que la diferencia de recarga entre los escenarios puede no ser significativa, y por lo tanto no puede afirmarse con certeza que un escenario va a ser peor que el otro.

5 Conclusiones

La recarga natural estimada para el acuífero ubicado entre los

ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa proyecta una disminución promedio de 38% en los períodos futuros 2023-2060 y 2061-2080 para un RCP de 4.5, y una disminución promedio de 33.9% en los períodos futuros 2023-2060 y 2061-2080 para un RCP de 8.5, ambos con respecto a la recarga estimada para el período histórico 1998-2022. Sin embargo, aunque en el escenario donde se considera un RCP 8.5, se obtuvo una mayor recarga para los dos períodos futuros con esa ruta de concentración representativa (lo que sugiere que la precipitación aumentó para esos períodos) debe tenerse claro que la tendencia general a largo plazo para la recarga del acuífero es decreciente en relación a la recarga estimada para el período histórico. En consecuencia, deberán aplicarse estrategias dirigidas a hacer un uso más eficiente del agua subterránea que contribuyan a preservar las reservas del acuífero estudiado.

Por otro lado, es importante conocer el posible efecto del cambio climático en variables como la precipitación y consecuentemente, en la recarga natural de acuíferos; ya que esto permite predecir de cierta forma los posibles cambios en la disponibilidad de agua subterránea y a su vez, permitiría mejorar la gestión del recurso. En ese sentido, como se mostró en este estudio el uso de modelos climáticos constituye una valiosa herramienta para generar escenarios climáticos locales que ayuden a entender y predecir el comportamiento de las condiciones del clima de un área determinada; teniendo en cuenta que hoy en día aún existe incertidumbre en relación a la tendencia de las variables hidrológicas y, que además, hay otros factores no climáticos que afectan el recurso agua subterránea, entre ellos actividades humanas como la agricultura de regadío con agua proveniente de pozos. Asimismo, debe considerarse que la disponibilidad del agua va a depender también de los cambios en la población, la producción y consumo de alimentos, la economía de cada región, entre otros aspectos.

Anexo A: Glosario de términos

Cambio climático: cambio del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones de su valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos (Bates y col., 2008).

Climate Explorer: es una aplicación web para la investigación climática administrada por el Real Instituto Meteorológico de los Países Bajos (KNMI) y contiene una colección completa de conjuntos de datos climáticos y herramientas de análisis (Trouet y col., 2013).

CMIP: el Proyecto de intercomparación de modelos de clima acoplados (CMIP en sus siglas en inglés, *Coupled Model Intercomparison Project*) es un marco experimental estándar para estudiar el resultado de los modelos acoplados de circulación general atmósfera-océano. Esto facilita la evaluación

de las fortalezas y debilidades de los modelos climáticos que pueden mejorar y enfocar el desarrollo de modelos futuros. Obtenido de <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-model-evaluation/cmip-climate-model-intercomparison-project-overview>.

CMIP5: se refiere al Proyecto de intercomparación de modelos de clima acoplados, fase 5; está definido por conjuntos de experimentos divididos en tres categorías: (I) simulaciones de pronósticos retrospectivos y predicciones decadales; (II) simulaciones de "largo plazo"; y (III) simulaciones de "atmósfera solamente" para modelos especialmente exigentes desde el punto de vista computacional. Obtenido de <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-model-evaluation/cmip-climate-model-intercomparison-project-overview>.

Forzamiento radiativo: cambio, expresado en vatios por metro cuadrado, W/m², de la irradiancia neta (la descendente menos la ascendente) en la tropopausa, debido a un cambio del dinamizante externo del cambio climático; por ejemplo, un cambio de la concentración de dióxido de carbono o de la energía emitida por el sol (Bates y col., 2008).

IPCC: el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés: *Intergovernmental Panel on Climate Change*) es el organismo internacional para evaluar la ciencia relacionada con el cambio climático. Fue creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Obtenido de: <https://www.ipcc.ch/about/>.

Trayectorias de concentración representativas (RCP) (*representative concentration pathways* (RCPs)): escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre (IPCC, 2014).

Variabilidad climática: hace referencia a las variaciones del estado medio y a otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos (Bates y col., 2008).

WorldClim: es una base de datos meteorológicos y climáticos globales de alta resolución espacial. Estos datos se pueden utilizar para el mapeo y el modelado espacial. Los datos se proporcionan para su uso en investigación y actividades relacionadas. Obtenido de: <https://www.worldclim.org/data/index.html>.


Referencias


Alcalá, F., (2005). Recarga a los acuíferos españoles me-

- diente balance hidrogeoquímico. Tesis docotral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona - España.
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S., Palutikof, J., (2008). El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC. Ginebra.
- Duque, R., Barrios, A., (1991). Modelo de simulación hidrológica para la estimación de la escorrentía a nivel mensual. Serie: Hidrología (H6), CIDIAT-ULA. Mérida - Venezuela.
- Gaertner, M., Gutiérrez, J., Castro, M., (2012). Escenarios regionales de cambio climático. Revista Española de Física. Vol 26-2. Disponible en: <http://revistadefisica.es/index.php/ref/article/view/1331>.
- IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático), (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra - Suiza.
- National Center for Atmospheric Research Staff [Agosto-2022]. The Climate Data Guide. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-model-evaluation/cmip-climate-model-intercomparison-project-overview>.
- Oviedo, B., León, G., (2010). Guía de procedimiento para la Generación de Escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá - Colombia.
- Pernía, J., Fornés, J., (2009). Cambio climático y agua subterránea. Revista Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. Vol 17(2). pp. 172-178.
- Romero, M., Gutiérrez-Ch, J., Jégat, H., (2022). Efecto del cambio climático sobre la recarga natural de un acuífero: Un caso de estudio en el estado Portuguesa - Venezuela. VIII Jornadas Científico Técnicas de la Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes. Mérida - Venezuela.
- Romero, M., (2023). Uso racional del recurso agua subterránea con fines de riego, entre los ríos Guache y Sarare del estado Portuguesa, considerando condiciones de cambio climático. Tesis de Maestría. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT. Mérida - Venezuela.
- Smith, M., Cross K., Paden, M., Laban, P., (2020). Acuíferos: Gestión sostenible de las aguas subterráneas. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales (UICN). San José - Costa Rica.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change [Agosto-2022]. About IPCC. <https://www.ipcc.ch/about/>.
- Trouet, V., Van, G., (2013). KNMI Climate Explorer: a web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. Artículo en Tree-Ring Research. Vol. 69(1). pp. 3-13.
- Vásquez, F., (2019). Variación en el potencial de riego del sistema Las Majaguas bajo condiciones de cambio climático. Tesis de Maestría. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT. Mérida - Venezuela.
- Vélez, M., (1999). Hidráulica de aguas subterráneas. (2da edición). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín - Colombia.
- Vélez, M., Vásquez, L., (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Posgrado en Recursos Hidráulicos.
- WorldClim [Agosto-2022]. Global climate and weather data. <https://www.worldclim.org/data/index.html>.

Recibido: 2 de diciembre 2022

Aceptado: 15 de marzo de 2023

Romero, Magally: Ingeniero Geólogo egresada de la Universidad de Los Andes. Candidata a M.Sc en Desarrollo de los recursos Aguas y Tierras. Mención: "Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos". CIDIAT - ULA.  <https://orcid.org/0009-0001-9982-8902>

Gutiérrez-Ch, José: Ph.D. en Ingeniería de las Estructuras, Cimentaciones y Materiales. Profesor Ayudante Doctor. E.T.S.I de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Correo electrónico: jg.gutierrez@upm.es.  <https://orcid.org/0000-0002-9107-6822>

Jégat, Hervé: Ingeniero Hidráulico. Ph.D en Mecánica de Fluidos. Profesor titular jubilado del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, CIDIAT, de la Universidad de Los Andes, Mérida - Venezuela. Correo electrónico: hjgat@gmail.com.  <https://orcid.org/0000-0003-0185-2873>

