

Estimación de la Oferta Hídrica Superficial de la Ciudad de Encarnación, Paraguay

Tatiana Wiczorko^{a,*} , Pedro García^b , Estelvina Rodríguez^a , María Ríos^a 

^a Universidad Nacional de Itapúa. Facultad de Ciencias y Tecnología. Itapúa, Paraguay.

^b Universidad del Quindío. Programa de Ingeniería Civil. Armenia, Colombia.

e-mails: tatianawiczorko@cyt.uni.edu.py, pedrogarcia@uniquindio.edu.co, investigacion@cyt.uni.edu.py, mariarios894@cyt.uni.edu.py

Resumen

El presente estudio se realizó en la ciudad de Encarnación, departamento de Itapúa, Paraguay y abarcó las cuencas de los arroyos Mboi Ka' e y Quiteria, las cuales ocupan casi el 85% del territorio municipal. Encarnación tiene una extensión total de 273,84 km² y como objetivo principal de este estudio se propuso estimar la oferta hídrica neta municipal. Para ello, se implementó una metodología cuyo insumo principal es la oferta hídrica total donde se ajusta el caudal total con los factores de reducción para mantener los regímenes de estiaje y reducción por irregularidad temporal. Como resultado, la estimación de la oferta hídrica superficial para la ciudad de Encarnación se calcula en 964.164.319 m³ o 964 hm³. Esta herramienta desempeña un papel clave en el monitoreo del objetivo de desarrollo sostenible número seis cuyo propósito es garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, y en particular los indicadores relacionados con el estrés hídrico y la eficiencia del uso del agua.

Palabras Clave – Caudal modal, Encarnación, Factor de reducción, Oferta hídrica, Paraguay.

Abstract

This study was conducted in Encarnación, located in the Itapúa department of Paraguay, focusing on the Mboi Ka' e and Quiteria stream basins, which together cover approximately 85% of the city's municipal territory. Encarnación spans a total area of 273,84 km² and the main objective of the study was to estimate the city's net water supply. The methodology used was based on the total water supply, with adjustments for flow reduction factors to account for low water levels and variability in flow due to temporal irregularities. As a result, the surface water supply for Encarnación was estimated at 964.164.319 m³ or 964 hm³. This tool is essential for monitoring Sustainable Development Goal 6, which seeks to ensure the availability and sustainable management of water and sanitation for all, particularly with regard to indicators related to water stress and water use efficiency.

Keywords – Encarnación, Modal flow, Paraguay, Reduction factor, Water supply .

1. Introducción

La población humana presenta un crecimiento exponencial a nivel mundial y esto influye en la disminución per cápita de la disponibilidad de todos los recursos, como el caso de los recursos hídricos. Esto sirve para identificar zonas críticas con menor disponibilidad que requieren mayor atención en cuanto a la gestión [1].

Paraguay se encuentra entre los diez países latinoamericanos con mayores reservas de agua dulce y su disponibilidad de agua es de aproximadamente 60.000 m³ per cápita/año, considerada una de las más altas del mundo [2], sin embargo otros autores consideran que la cifra es más cercana a los 18.000 m³ per cápita/año, tomando en cuenta que la disponibilidad hídrica tiende a disminuir como consecuencia natural del crecimiento demográfico [3].

Si bien la disponibilidad hídrica del Paraguay se considera elevada, no está uniformemente

distribuida en el territorio nacional, observándose dos regiones con características hídricas bien diferenciadas como la región occidental con déficit hídrico durante todo el año y la región oriental con mayor disponibilidad de agua [2].

A nivel país existen pocos antecedentes de estudios de cuantificación de recursos hídricos y en especial en la ciudad de Encarnación. Tomando en cuenta lo anterior, es de gran importancia contar con trabajos que estimen la cantidad de oferta hídrica superficial que abastezca y satisfaga las necesidades básicas de las poblaciones humanas, pero cabe señalar que la principal limitación para validar los cálculos es la falta de mediciones específicas y la superposición de la delimitación de zonas que son abastecidas de manera superficial y de la napa freática a través de pozos.

La sobreexplotación de una fuente de agua puede tener efectos sobre las características de la calidad y alterar la dinámica de flujo transportándola desde la fuente abastecedora hasta la receptora de efluentes, finalmente la excesiva presión sobre el recurso puede conducir a su desaparición. En este sentido es importante para las labores de planificación sostenible del recurso conocer la oferta hídrica, los niveles de demanda y las condiciones de interacción hidráulica necesarias para mantener la calidad y cantidad de agua disponible [4].

En este sentido, la oferta hídrica de una cuenca es el volumen disponible para satisfacer la demanda generada por los ecosistemas acuáticos, las prácticas culturales, las actividades sociales y económicas. El conocimiento del caudal superficial, su confiabilidad y extensión de la serie del registro histórico son variables que pueden influir en la estimación de la oferta hídrica superficial [5].

En Paraguay una de las mayores dificultades para realizar estudios de estimación de la oferta hídrica es la falta de datos, ya que no existe instrumentación para la medición de caudales, como es el caso de las cuencas de los arroyos Mboi Ka'e y Quiteria. Por lo tanto, la aplicación de métodos indirectos como modelos que estiman esta oferta hídrica resulta importante para elaborar planes de manejo de las cuencas hidrográficas y hacer valoraciones económicas del recurso hídrico ofrecido por ellas [6].

De esta manera, la estimación de la oferta hídrica superficial de la ciudad de Encarnación, la cual posee 143.281 habitantes [7], desempeña un papel clave en el monitoreo del objetivo de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas número seis cuyo propósito es garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, y en particular los indicadores relacionados con el estrés hídrico y la eficiencia del uso del agua [8]. Además, la academia tiene dentro de sus objetivos el estudio de problemas locales y la generación de líneas de trabajo que favorezcan la preservación y planificación del recurso hídrico, especialmente en estos tiempos de crisis.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

De los 273,84 km² que ocupa Encarnación, 232,68 km² son parte de las cuencas de los arroyos Quiteria y Mboi Ka'e [9] y casi 85% del territorio está influenciado por las condiciones hidráulicas, hidrológicas y ambientales de los cursos de agua de estas dos cuencas [10].

Las áreas donde se encuentran las cuencas de los Arroyos Quiteria y Mboi Ka'e, tienen la menor temperatura en el país y también la mayor precipitación. De acuerdo a información de estaciones meteorológicas, la temperatura media anual es de 21 °C siendo el mes más caliente enero (28 °C) y julio el más frío (16 °C) [11]. La precipitación media anual de la zona es de 1.750 mm y está distribuida regularmente a lo largo del año, excepto en el invierno cuando disminuye relativamente [12], [13].

En la Fig. 1, se muestra la delimitación de las cuencas y el área de estudio:

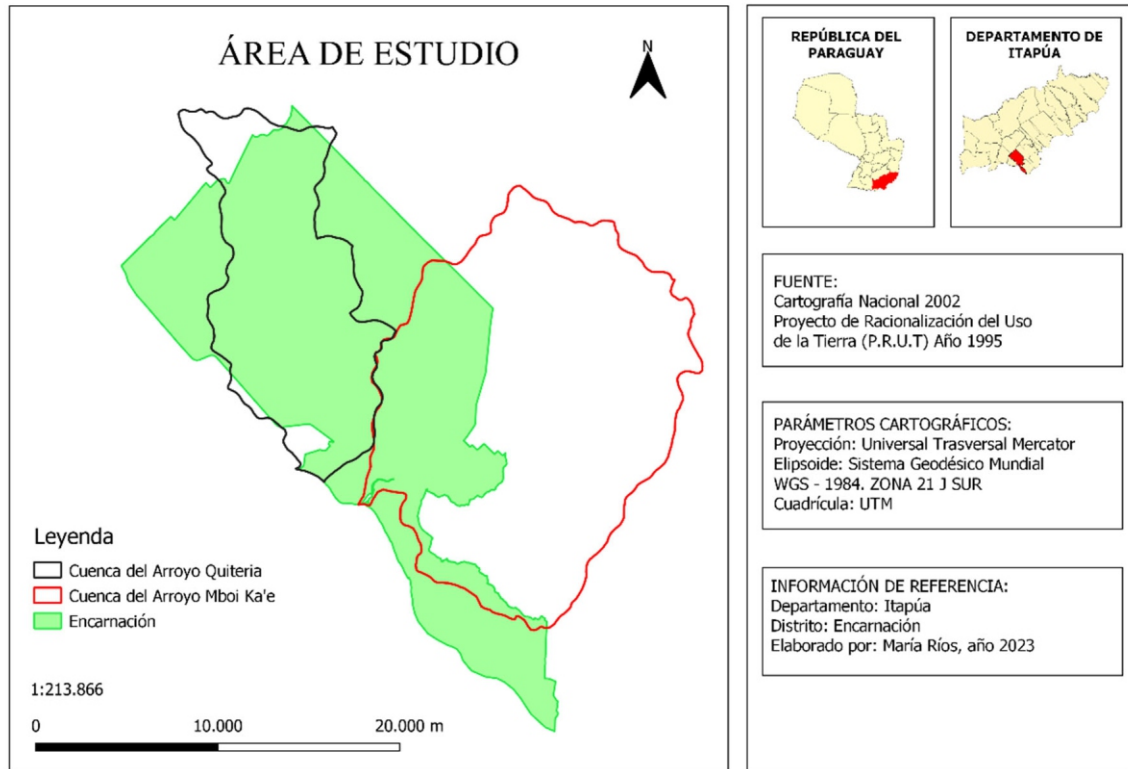


Fig. 1. Delimitación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1 se presentan las características y el balance hídrico de las cuencas de los arroyos Mboi Ka'e y Quiteria según Rivero y Romero [2]:

Tabla 1. Características de las cuencas de los arroyos Mboi Ka'e y Quiteria

| Cuenca del Arroyo Mboi Ka'e | | | Cuenca del Arroyo Quiteria | | |
|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|-----------|
| Características | Área (km ²) | 287 | Características | Área (km ²) | 348 |
| | Perímetro (km) | 80 | | Perímetro (km) | 139 |
| | Centroide X (m) | 619.423 | | Centroide X (m) | 608.725 |
| | Centroide Y (m) | 6.981.749 | | Centroide Y (m) | 6.993.831 |
| | Centroide Z (m) | 192 | | Centroide Z (m) | 180 |
| | Cota mín (msnm) | 75 | | Cota mín (msnm) | 67 |
| | Cota máx (msnm) | 290 | | Cota máx (msnm) | 280 |
| | Altitud media (msnm) | 192 | | Altitud media (msnm) | 180 |
| | Altitud más frecuente (msnm) | 148 | | Altitud más frecuente (msnm) | 163 |
| | Altitud de frecuencia 1/2 (msnm) | 179 | | Altitud de frecuencia 1/2 (msnm) | 175 |
| | Pendiente promedio (%) | 17 | | Pendiente promedio (%) | 15 |
| | Orden de cuenca | 6 | | Orden de cuenca | 6 |
| | Pendiente media de la red hídrica (%) | 2 | | Pendiente media de la red hídrica (%) | 1 |
| | Longitud del cauce principal (km) | 33 | | Longitud del cauce principal (km) | 27 |
| Longitud de la red hídrica (km) | 748 | Longitud de la red hídrica (km) | 881 | | |

| | | | | | |
|--|--|----------|--|--|----------|
| Balance hídrico año hidrológico medio | Precipitación - P (mm/año) | 1.797,48 | Balance hídrico año hidrológico medio | Precipitación - P (mm/año) | 1.797,48 |
| | Evapotranspiración potencial - ETP (mm/año) | 1.290,97 | | Evapotranspiración potencial - ETP (mm/año) | 1.290,97 |
| | Evapotranspiración real - ETR (mm/año) | 1.051,73 | | Evapotranspiración real - ETR (mm/año) | 1.070,98 |
| | Escorrentía - ESC (mm/año) | 62,09 | | Escorrentía - ESC (mm/año) | 60,56 |
| | Caudal total simulado - QT (m ³ /s) | 6,86 | | Caudal total simulado - QT (m ³ /s) | 8,14 |
| | Caudal específico de la cuenca - q (l/s*km ²) | 23,95 | | Caudal específico de la cuenca - q (l/s*km ²) | 23,37 |
| | Aportación total a la salida de la cuenca - APT (hm ³ /año) | 213,51 | | Aportación total a la salida de la cuenca - APT (hm ³ /año) | 253,09 |
| | Caudal subsuperficial - Qsub (m ³ /s) | 1,39 | | Caudal subsuperficial - Qsub (m ³ /s) | 1,87 |

2.2. Método

El método utilizado para el desarrollo del presente estudio partió de una búsqueda exhaustiva de información en las entidades públicas y privadas, páginas web y bases de datos de entes territoriales, con el fin de seleccionar el material útil para el trabajo. Se utilizaron los datos de Rivero y Romero [2] comprendido entre los años 1980 – 2013 que aplicó el cálculo hidrometeorológico de aportaciones y crecidas (CHAC), desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del Ministerio de Fomento de España.

El cálculo de la oferta hídrica superficial neta resulta de la ecuación (1) [14]:

$$O_n = O_t \times (1 - R_e + R_{it}) \tag{1}$$

Dónde: O_t – Oferta hídrica superficial total (m³); R_e – Factor de reducción para mantener el régimen de estiaje; R_{it} – Factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica.

La oferta hídrica superficial total se expresa como (2):

$$Q_t = Q_0 \times T \tag{2}$$

Dónde: Q_0 - Caudal modal de la fuente abastecedora (m³/s), el cual fue calculado a partir del caudal simulado medio anual [2] y T cantidad de segundos en un año.

Para definir R_e se construyó la curva de densidad probabilística (CDP) de los caudales de estiaje mínimos (Q_{min}) utilizando el *Software* R [15] a partir de los datos de caudales mínimos anuales simulados de la serie enero 1981 a diciembre 2012 [2] con una longitud de 32 años. De esta curva se extrajo el caudal de estiaje con 97,5% de probabilidad de excedencia Q_{min} 97,5% de modo que la reducción para mantener el régimen de estiaje de la fuente es igual a (3) [14]

$$R_e (\%) = 100 \times \left(\frac{min_{97,5\%}}{Q_0} \right) \tag{3}$$

Las series de caudales promedios anuales de estiaje simulados fueron ajustadas a funciones de distribución de probabilidad (FDP) teóricas de tres parámetros. Este ajuste fue realizado bajo la verificación de hipótesis de concordancia al 5% de significación usando los criterios de Anderson-Darling, Cramer-Von Mises y Kolmogorov-Smirnov y mostró que la función de Weibull es la más adecuada seguida de las funciones Log Normal y Gamma.

La reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica se estimó a través de (4), un funcional de la forma [16]:

$$R_{it} = f(Q_0, C_v, C_s, \rho) \quad (4)$$

Donde C_v , C_s y ρ representan los coeficientes de variación y de asimetría de los caudales promedio anuales y el radio de correlación de los caudales diarios.

Sin embargo, ante limitaciones como la corta longitud de las series de caudales anuales y de estiaje y la complejidad del parámetro ρ , como primera aproximación para obtener R_{it} se recomienda aplicar la siguiente tabulación presentada en la Tabla 2 [16]:

Tabla 2. Escala de reducciones por irregularidad temporal de la oferta hídrica

| $C_v R$ | it (%) |
|-----------|----------|
| 0 – 0.2 | 15 |
| 0.2 – 0.3 | 25 |
| 0.3 – 0.4 | 35 |
| 0.4 – 0.6 | 40 |
| >0.6 | 50 |

3. Resultados

Para evaluar la oferta hídrica superficial neta de la ciudad de Encarnación, se procedió a la estimación de los caudales modales para cada una de las fuentes abastecedoras, a partir de los caudales totales mensuales simulados de 1.980 a 2.012 [2]. Para la cuenca del arroyo Mboi Ka'ë se obtuvo un caudal modal de 0,69 m³/s y para la cuenca del arroyo Quiteria 1,05 m³/s.

Seguidamente, se estimó la oferta hídrica superficial total aplicando la Ecuación (2), la cual se define como el volumen de agua que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial, es decir es el agua que fluye por la superficie del suelo que no se infiltra o se evapora y se concentra en los cauces de los ríos o en los cuerpos de agua lénticos [17]. En este sentido, la cuenca del arroyo Mboi Ka'ë presentó una oferta hídrica superficial total de 21.759.840 m³ y la cuenca del arroyo Quiteria 33.112.800 m³.

De las CDP y FDP para los caudales promedio anuales simulados se obtuvieron los caudales de estiaje del 97,5% de probabilidad de excedencia de 0,047 m³/s para Mboi Ka'ë y 0,0541 m³/s para Quiteria.

De la CDP de caudales promedio anuales simulados se obtuvieron los coeficientes de variación de 0,40 para Mboi Ka'ë y 0,41 para Quiteria, lo que indica según la Tabla 2 que R_{it} es igual a 0,4 para ambas cuencas, es decir que por irregularidad temporal la oferta se debe reducir en 40%.

Por otra parte, aplicando la Ecuación (3), se deduce que para conservar el caudal de estiaje la oferta también se debe reducir en 6,9% para Mboi Ka'ë y en 5,1% para Quiteria.

En total los dos factores aplicados reducen la oferta hídrica superficial de las cuencas de los arroyos Mboi Ka'ë y Quiteria en 46,9% y 45,1% respectivamente.

Aplicando la Ecuación (1) se estimó la oferta hídrica superficial neta para las cuencas de los arroyos Mboi Ka'ë y Quiteria de 741.466.548 m³ y 1.186.862.090 m³ respectivamente.

En la Tabla 3 se presentan las estimaciones calculadas para cada una de las variables estudiadas.

Tabla 3. Resultados obtenidos para las cuencas de los arroyos Mboi Ka'e y Quiteria.

| Variables estimadas | Cuenca del Arroyo Mboi Ka'e | Cuenca del Arroyo Quiteria |
|--|--|--|
| Caudal modal de la fuente abastecedora – Q_o | 0,69 m ³ /s | 1,05 m ³ /s |
| Cantidad de segundos en un año - T | 31.536.000 s | 31.536.000 s |
| Oferta hídrica superficial total – O_t | 21.759.840 m ³ | 33.112.800 m ³ |
| Caudal de estiaje con el 97,5% de probabilidad de excedencia - $Q_{min\ 97,5\%}$ | 0,0477832 m ³ /s | 0,05415148 m ³ /s |
| Factor de reducción para mantener el régimen de estiaje – R_e | 6,925% | 5,157% |
| Coefficiente de variación de los caudales promedio anuales - C_v | 0,40 | 0,41 |
| Factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica – R_{it} | 40% | 40% |
| Oferta hídrica superficial neta – O_n | 741.466.548 m ³ 741,46 hm ³ | 1.186.862.090 m ³ 1.186,86 hm ³ |

4. Discusión

A pesar de que Paraguay cuenta con una gran cantidad de recursos hídricos, este recurso no es infinito ni está distribuido homogéneamente en el territorio nacional y por esta razón la administración y gestión del recurso a escala nacional, regional y local debe tener en cuenta tendencias y escenarios futuros que permitan avanzar hacia un desarrollo sostenible.

En este sentido, la estimación de la oferta hídrica superficial para Encarnación se calcula en 6.729,18 m³ per cápita/año, siendo éste un valor que está por encima de 5.000 m³ per cápita/año, cantidad promedio para la mayoría de los países de Latinoamérica, según el Índice de Disponibilidad de Falkenmark, reportado por Ballestero y colaboradores [18].

La oferta hídrica superficial, la cual se obtiene del promedio de las ofertas hídricas superficiales de las cuencas de los arroyos Mboi Ka'e y Quiteria se estimó en 964.164.319 m³. Esta herramienta trae al presente consideraciones sobre la necesidad de tomar acciones dirigidas a reducir el riesgo de desabastecimiento futuro.

Según el estudio realizado por Costa y colaboradores [14] para los municipios colombianos, los dos factores aplicados (R_{it} y R_e) reducen la oferta hídrica superficial de todos los municipios en 51%, presentando una oferta con probabilidad de excedencia 97,5% de 107.300.563 m³ para el municipio de Cúcuta; 12.057.306 m³ para el municipio de Los Patios y 8.771.747 m³ para el municipio de Villa del Rosario siendo estos 88%, 98% y 99% menores respectivamente a los estimados para el municipio encarnaceno.

5. Conclusiones

La determinación de la oferta hídrica superficial es de importancia debido a varios factores clave que afectan tanto el bienestar humano como el equilibrio ambiental y conocer la cantidad de agua disponible es esencial para asegurar que haya suficiente agua potable para satisfacer las necesidades básicas de la población, incluyendo el consumo doméstico, la higiene y la salud pública.

Sin embargo, es importante destacar que la oferta hídrica no solo cumple una función crucial para el abastecimiento humano, sino que también tiene un rol significativo en otros sectores clave. La agricultura, por ejemplo, depende del agua para la irrigación de cultivos, lo que asegura la continuidad

de la cadena de suministro de alimentos. El sector industrial y manufacturero utiliza agua en sus procesos de producción, siendo indispensable para numerosas actividades económicas. Además, el agua también impulsa el desarrollo de actividades recreativas y turísticas, como parques acuáticos, playas, la navegación y la pesca, todas ellas con impacto en las economías locales y nacionales.

Los cuerpos de agua superficiales también son parte integral de los ecosistemas locales y desempeñan un papel crucial en la conservación de la biodiversidad, siendo que los ríos y lagos brindan hábitats para diversas especies y contribuyen a la regulación del ciclo del agua y en un contexto de cambio climático, es fundamental entender la disponibilidad y variabilidad de los recursos hídricos ya que una oferta hídrica adecuada puede ayudar a las ciudades a mitigar los efectos de sequías, inundaciones y otros eventos climáticos extremos.

La oferta hídrica superficial estimada en 964.164.319 m³ en la ciudad de Encarnación, representa un recurso importante para el desarrollo sostenible y el bienestar de la comunidad. Esta abundante reserva de agua proporciona la base para diversas actividades humanas, sin embargo es fundamental que se adopten medidas adecuadas de gestión y conservación para garantizar la disponibilidad a largo plazo de este recurso.

El monitoreo constante de los niveles de agua, la promoción de prácticas de uso responsable y la implementación de políticas de protección ambiental son esenciales para preservar esta oferta hídrica y garantizar su disponibilidad para las generaciones presentes y futuras, además la colaboración entre las autoridades locales, los ciudadanos y las organizaciones de conservación es crucial para aprovechar de manera sostenible este recurso y garantizar la resiliencia de la ciudad frente a los desafíos hídricos que puedan surgir en el futuro.

El fortalecimiento de la gestión integral del recurso hídrico, especialmente en las estrategias de protección de la oferta hídrica existente, de la expansión de las redes hidrométricas y de otros mecanismos de seguimiento del recurso son importantes. Este estudio genera información para activar, conectar e interactuar en futuras líneas de trabajo que podrían enfocarse en la adquisición de datos, el monitoreo del recurso hídrico, el desarrollo de indicadores para seguimiento de oferta, demanda y prestación del servicio.

Algunas limitaciones abordadas en este trabajo se debieron a la dificultad de considerar adecuadamente todos los factores que reducen la oferta total al estimar la oferta neta, como por ejemplo la calidad del agua y las necesidades ecológicas por encima de los caudales mínimos históricos, además de la incertidumbre asociada a la escala de la información disponible ya que no se cuenta con información primaria a escala local forzando el uso de datos simulados y estimaciones.

Referencias

- [1] M. del C. Álvarez, *Disponibilidad hídrica del Paraguay*, Segunda Edición. Asunción: Investigación para el desarrollo, 2015. [Online]. Available: www.desarrollo.org.py
- [2] R. Rivero and E. Romero, "Balance hídrico superficial de Itapúa," Trabajo Final de Grado, Universidad Nacional de Itapúa, Encarnación, 2014.
- [3] M. R. Servín and A. Insfrán, "Vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas en sistemas de abastecimiento comunitario de Encarnación - Paraguay," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 5, no. 6, Dec. 2021, doi: 10.37811/cl_rcm.v5i6.1338.
- [4] A. Boretti and L. Rosa, "Reassessing the projections of the World Water Development Report," *NPJ Clean Water*, vol. 2, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41545-019-0039-9.
- [5] M. I. Brunner, L. Slater, L. M. Tallaksen, and M. Clark, "Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review," May 01, 2021, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/wat2.1520.
- [6] L. Otaña, G. Vásquez, and G. Bustamante, "Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos," *Rev.fac.Nal.Agr.Medellín*, vol. 61, no. 1, pp. 4366–4380, 2008.

- [7] INE, “Instituto Nacional de Estadística,” Itapúa Proyecciones de población por sexo y edad, 2023. Accessed: May 03, 2024. [Online]. Available: https://www.ine.gov.py/Publicaciones/Proyecciones%20por%20Departamento%202023/07_Itapua_2023.pdf
- [8] Naciones Unidas, “Objetivos de Desarrollo Sostenible,” Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Accessed: Jun. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- [9] Global Consultores, “Gestión integrada de las cuencas de los arroyos Mbói Cae y Quiteria,” 2008. Asunción: Entidad Binacional Yacyretá.
- [10] Ecosistema Urbano, “Plan Encarnación Más - Plan de Desarrollo Sustentable y Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de Encarnación, Paraguay,” Diagnóstico y Objetivos - Parte 2 - Medioambiente y Territorio. Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: https://issuu.com/ecosistemaurbano/docs/03-morfologia_urbana_-_reduced/7
- [11] K. Musálem, “Assessing integrated watershed management and spatial groundwater vulnerability to pollution in priority watersheds of the Yacyreta dam in Paraguay,” Dissertation, Bangor University, Bangor, 2010. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/263444873>
- [12] K. Musálem, “Cuencas prioritarias del embalse Yacyreta caracterización del arroyo Mboi Caé, Itapúa, Py,” Mar. 2008. Accessed: Mar. 04, 2024. [Online]. Available: https://www.academia.edu/58755731/Caracterizaci%C3%B3n_Del_R%C3%ADo_Mboi_Cae
- [13] K. Musálem, “Cuencas prioritarias del embalse Yacyreta caracterización de l arroyo Quiteria, Itapúa, Py,” 2008. Accessed: Mar. 04, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/268515266_CHARACTERIZACION_DEL_RIO_QUITERIA
- [14] C. Costa, E. Domínguez, H. Rivera, and R. Vanegas, “El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico?,” *Revista de ingeniería*, vol. 22, pp. 104–111, 2005.
- [15] R Core Team, “R: A language and environment for statistical computing,” 2020, *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*. Accessed: Jun. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.R-project.org/>
- [16] E. A. Domínguez Calle, H. G. Rivera, R. Vanegas Sarmiento, and P. Moreno, “Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano,” *Rev Acad Colomb Cienc Exactas Fis Nat*, vol. 32, no. 123, pp. 195–212, 2023, doi: [https://doi.org/10.18257/raccefyn.32\(123\).2008.2257](https://doi.org/10.18257/raccefyn.32(123).2008.2257).
- [17] IDEAM, *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá: Panamericana Formas e Impresos S.A., 2015.
- [18] M. Ballesteros, V. Arroyo, and A. Mejía, *Inseguridad Económica del Agua en Latinoamérica: de la abundancia a la inseguridad*, CAF. Buenos Aires, 2015. Accessed: Jun. 19, 2023. [Online]. Available: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00406.pdf>