

# Análisis de la disponibilidad y demanda hídrica en una zona con alta demanda de riego por pivote central en Brasil

## Analysis of water availability and demand in an area with high demand for center-pivot irrigation in Brazil

Marinaldo Loures Ferreira<sup>1</sup> , André Medeiros de Andrade<sup>2</sup> ,  
Wesley Esdras Santiago<sup>3</sup>  y Rodrigo Praes de Almeida<sup>4</sup> 

### RESUMEN

El conocimiento de la disponibilidad hídrica ha sido esencial para ayudar en el uso racional de los recursos hídricos y fomentar la expansión de la agricultura irrigada. Este estudio realiza un análisis hidroclimático de los recursos hídricos, con el objetivo de analizar la disponibilidad y la demanda de agua para el riego. En el modelo se utilizaron productos de teledetección, que incluyen series temporales de evapotranspiración, precipitación y datos de campo, que contienen series temporales de caudal de los ríos. Considerando el 70% del caudal  $Q_{95}$  según el escenario adoptado, se logró satisfacer el 40% del área irrigada con la demanda de agua satisfecha. Debido a la disminución de las lluvias y los recursos hídricos, los límites de concesión de los recursos hídricos en la región de estudio pueden ser alcanzados con una frecuencia mucho mayor de lo planeado. La combinación del aumento de la demanda de agua para el riego y el mantenimiento de caudales bajos puede traer consecuencias críticas para la gestión hídrica de la región en los próximos años. Los métodos utilizados se mostraron efectivos, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones y siendo fundamentales para la planificación y gestión de recursos hídricos.

**Palabras claves:** Geoprocamiento, Google Earth Engine, Pivote central, Regionalización del flujo.

### ABSTRACT

The knowledge of water availability has been essential to assist in the rational use of water resources and promote the expansion of irrigated agriculture. This study conducts a hydroclimatic analysis of water resources to assess the availability and water demand for irrigation. Remote sensing products were used in the model, including time series of evapotranspiration, precipitation, and field data, which include time series of river flow. Considering 70% of the  $Q_{95}$  flow under the adopted scenario, 40% of the irrigated area had its water demand met. Due to the decrease in rainfall and water resources, the limits of water resource allocation in the study region may be reached much more frequently than planned. The combination of increasing water demand for irrigation and

<sup>1</sup> Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. marinaldo.loures@ufvjm.edu.br

<sup>2</sup> Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. andre.medeiros@ufvjm.edu.br

<sup>3</sup> Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. wesley.santiago@ufvjm.edu.br

<sup>4</sup> Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. rodrigo.praes@ufvjm.edu.br

maintaining low flows can have critical consequences for the water management of the region in the coming years. The methods used have proven to be effective, providing valuable information for decision-making, and are essential for water resource planning and management

**Keywords:** Geoprocessing, Google Earth Engine, Center-pivot, Flow regionalization.

## Introducción

El agua, considerada un recurso limitado, es un requisito elemental para la vida en la Tierra (Ramachandran et al., 2022). En los últimos años, la mayoría de los países del mundo han sufrido de estrés hídrico y sequías (Ahansal et al., 2022). El uso del agua ha aumentado a nivel global, impulsado por una combinación de crecimiento poblacional, desarrollo socioeconómico y cambios en los patrones de consumo (Unesco, 2019). Esto, junto con la falta de precipitación, ha contribuido a la disminución de los recursos hídricos, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria de muchos países (Ahansal et al., 2022).

La agricultura es la actividad que demanda el mayor consumo de agua, siendo responsable del 72% de todas las captaciones de aguas superficiales y subterráneas a nivel mundial (FAO, 2021). En Brasil, el riego representó el 50,0% del agua extraída en el año 2020 (ANA, 2022). Esto se debe al crecimiento del área irrigada en el país, que se ha más que duplicado, pasando de 3,1 millones de hectáreas en 1996 a 8,2 millones de hectáreas en 2019 (ANA, 2021).

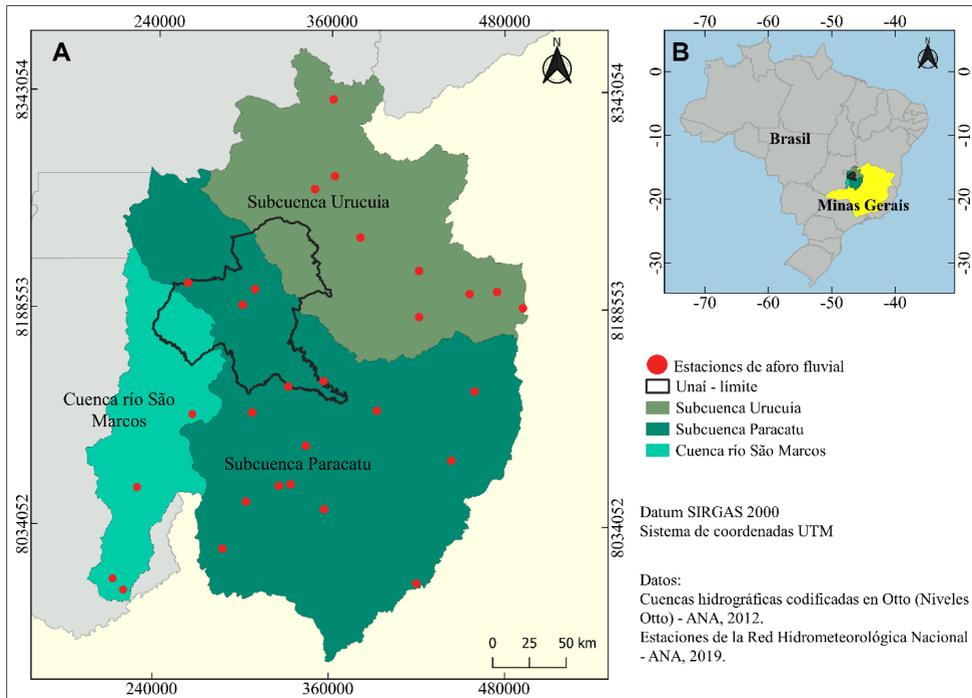
El aumento en el uso del agua requiere estrategias relacionadas con el riego e información precisa sobre la extensión espacial de la agricultura (Teluguntla et al., 2018). Esta información va más allá de la gestión de los recursos hídricos, ya que su importancia se refleja en la seguridad hídrica, alimentaria y en la evaluación del impacto del cambio climático en el sector agrícola (Mpandeli et al., 2019). Por lo tanto, el conocimiento de la disponibilidad hídrica es esencial para ayudar en el uso racional de los recursos hídricos, contribuyendo a la toma de decisiones enfocadas en una planificación hídrica eficiente y sostenible (Lima et al., 2019; Schmidt; Lima y Jesus, 2018).

En este contexto, este trabajo tuvo como objetivo analizar la disponibilidad y demanda hídrica para el riego en una región donde hay un intenso crecimiento del área irrigada, lo que contribuye al aumento de la presión sobre los recursos hídricos (ANA, 2021). Por lo tanto, el modelo de análisis de la disponibilidad y demanda hídrica destinado a la gestión y promoción del riego, se aplicó en el municipio de Unaí, estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1), que cuenta con la segunda mayor área de riego por pivote central en el país, aproximadamente 68,278 ha (año base 2022) (MapBiomias, 2023), y ocupa el primer lugar en la producción de cereales, algodón herbáceo, maíz y soja en el estado (FJP, 2023; IBGE, 2023). El bioma característico es el Cerrado, con un clima del tipo Aw, que corresponde a un clima tropical lluvioso, con predominio de inviernos secos (Kottek et al., 2006). La temperatura media anual oscila entre 17 °C y 31 °C (Epamig, 2014). El régimen de lluvias de la región se caracteriza por un período lluvioso de octubre a abril, con un período seco que se extiende durante cinco meses, de mayo a septiembre, lo que contribuye a que la precipitación total media anual oscile entre 1,322 y 1,618 mm (Silva et al., 2017).

El área utilizada en el estudio tiene una extensión territorial de 8,448.08 km<sup>2</sup> (IBGE, 2019). Está ubicada dentro de tres áreas hidrográficas de interés, la cuenca del río São Marcos, la subcuenca Paracatu y la subcuenca Urucua (Figura N°1), siendo necesario conocer el caudal hídrico de estas áreas para evaluar la disponibilidad de agua dentro del límite del área de interés.

**Figura N°1.**

Mapa de ubicación. A) Ubicación de las regiones hidrográficas. B) Ubicación de Minas Gerais.



Fuente: Elaboración propia.

Los avances en tecnologías de teledetección en conjunto con el surgimiento de big data y plataformas de procesamiento basadas en la nube, como Google Earth Engine (GEE), han contribuido a la clasificación de áreas irrigadas, proporcionando una mayor precisión en tiempo y costo-beneficio (Amani et al., 2020; Norton et al., 2021). Por lo tanto, el principal objetivo de este trabajo es proporcionar estimaciones de la cantidad de agua utilizada para el riego utilizando productos de teledetección. Para el año 2020, utilizamos el mapeo de los pivotes centrales en el área de estudio (datos de la plataforma MapBiomás) y estimamos la lámina mensual de riego aplicada mediante una ecuación de balance hídrico utilizando productos de evapotranspiración (del sensor MODIS - MOD16A2) y precipitación (del Clima Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data - CHIRPS) como insumos.

## Materiales y métodos

La demanda para el riego se estimó a partir de dos datos principales: las áreas irrigadas por pivote central (ha) y la lámina media de aplicación ( $l\ s^{-1}\ ha^{-1}$ ), siendo la demanda el resultado de multiplicar estas dos variables.

La información de Evapotranspiración de Referencia mensual se obtuvo a través de datos del producto MOD16A2 del sensor MODIS y se procesó en Google Earth Engine (GEE). El MOD16A2, versión 6 (Evapotranspiración / Flujo de Calor Latente), es un conjunto de datos compuesto de ocho días, con una resolución de píxeles de 500 metros, a bordo de las plataformas Aqua y Terra, cuya recopilación de datos comenzó en el año 2000 (USGS, 2017). Este producto se basa en la lógica de la ecuación de Penman-Monteith, que incluye datos de reanálisis meteorológicos diarios junto con productos de datos detectados remotamente por espectrorradiómetro de imagen de resolución moderada, como dinámica de vegetación, albedo y cobertura del suelo (Running et al., 2019).

Por lo tanto, en la plataforma de GEE, se seleccionó la banda de Evapotranspiración Potencial Total (PET), seccionada por el límite del área de estudio, se aplicó el filtro de la mediana y el factor de escala para transformar los datos de ( $\text{kg m}^{-2} \text{8día}^{-1}$ ) a  $\text{mm mes}^{-1}$ . Luego, se calculó la evapotranspiración media mensual para los doce meses en milímetros por mes, utilizando algoritmos en GEE y se exportó a Google Cloud Platform, donde se incorporó en el software de geoprocésamiento para la elaboración de mapas temáticos.

En otra etapa, se calculó el promedio de los valores de evapotranspiración de la colección de imágenes para cada mes, analizando el período de 2002 a 2020, proceso que se realizó mediante la plataforma de GEE. Estos datos se utilizaron para crear una tabla con valores medios mensuales en ( $\text{mm mes}^{-1}$ ), que posteriormente se aplicaron en los cálculos de la demanda de riego.

Para la precipitación efectiva mensual, se utilizaron datos del Clima Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS). Estos datos corresponden a un conjunto de información de lluvias casi global, que abarca desde 1981 hasta el presente. El CHIRPS incorpora datos orbitales con una resolución espacial de  $0,05^\circ$  y datos de estaciones meteorológicas in situ para crear series temporales de precipitación en cuadrícula para el análisis de tendencias y el monitoreo de sequías estacionales (Funk et al., 2015). Por lo tanto, los datos de CHIRPS fueron procesados en GEE, con un período de análisis que abarca desde el año 2000 hasta 2020.

La Resolución de la ANA n° 707 (ANA, 2004) establece una Eficiencia mínima del sistema de riego por pivote central del 85%, considerando un valor adicional de agua para satisfacer las necesidades del cultivo, incluyendo las pérdidas en la captación, conducción y aplicación. También se utilizó el  $K_c$  (coeficiente de cultivo) del cultivo de maíz para el cálculo de la lámina media, ya que este cultivo requiere una cantidad promedio de agua mayor que otros cultivos.

El desarrollo del caudal de extracción de agua para el riego en el municipio de Unai puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{m,i} = \sum_{m=1}^n A_{t,i} \left[ \frac{(ET_{o,m,m} K_{c,m}) - P_{ef,m,m}}{E_{a,m,m}} \right] 10 \quad (1)$$

En la que:

$Q_{m,i}$  = Caudal de extracción para el riego en el municipio, en  $\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$ ;

$A_{t,i}$  = Área total irrigada en el municipio durante el mes, en ha;

$ETo_{m,m}$  = Evapotranspiración de referencia en el municipio para el mes, en mm mes<sup>-1</sup>;

$Kc_m$  = Coeficiente del cultivo para el mes, adimensional;

$Pef_{m,m}$  = Precipitación efectiva en el municipio para el mes, en mm mes<sup>-1</sup>; y

$Ea_{m,m}$  = Eficiencia de aplicación, adimensional.

Todos los caudales, obtenidos en m<sup>3</sup> mes<sup>-1</sup>, se convirtieron a m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> en función del número de días del mes. A partir del volumen de necesidad hídrica del cultivo, se puede determinar el consumo medio mensual por hectárea (L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>) mediante la siguiente ecuación:

$$Cm = \frac{V(m^3 \text{ mês}^{-1}) 1000(L \text{ m}^{-3})}{N(\text{días mês}^{-1}) 24(\text{h día}^{-1}) 3600(\text{s h}^{-1}) A(\text{ha})} \quad (2)$$

En donde: V = Volumen mensual; N = Número de días del mes; y A = Área irrigada.

El consumo medio mensual por hectárea (L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>) es un valor adecuado para ser utilizado en comparaciones, ya que supone un suministro continuo de agua, es decir, representa la necesidad de riego si este se realizara de manera continua a lo largo del tiempo (IGAM, 2010).

Considerando situaciones adversas, se consideró una situación hipotética en la que todos los pivotes centrales estarían cultivando maíz al mismo tiempo. El maíz de segunda cosecha generalmente se cultiva en sucesión con el cultivo de verano, dependiendo de la cosecha del cultivo anterior, y se siembra en los meses de enero, febrero y marzo (Cunha et al., 2019).

Se utilizó la fecha del 25 de marzo como inicio de la simulación de siembra, considerando que los productores irrigadores del municipio de Unaí podrían haber sembrado el cultivo de verano en octubre de 2019, cosechándolo en febrero de 2020 y plantando el maíz de segunda cosecha irrigado cerca del período de cosecha del cultivo anterior. Con el fin de evaluar un escenario crítico, la fecha de siembra considerada fue motivada por el período seco del área de estudio, que abarca de mayo a septiembre, siendo junio, julio y agosto el trimestre más seco.

Por lo tanto, se consideró que el maíz plantado pertenece a una variedad de ciclo largo, de 120 días, adoptando 100 días como el período de riego para el cultivo (del 25 de marzo al 3 de julio). El ciclo varía según la región en la que se cultiva el maíz; para efectos del zoneamiento agrícola, el ciclo se basa en el período de floración estimado en función de la suma térmica o el total de unidades de calor entre 10 °C y 30 °C necesarios para completar el período desde la emergencia hasta la floración del cultivo (Embrapa, 2011).

A través de los datos de la Red Hidrometeorológica Nacional disponibles en el portal de la ANA, se procedió a la identificación de las estaciones fluviométricas presentes en la cuenca hidrográfica

del río São Marcos y en las subcuencas hidrográficas Paracatu y Urucuia. Posteriormente, se llevó a cabo la clasificación de las estaciones obtenidas en el portal HidroWeb, observando la disponibilidad de datos a lo largo del período de registro disponible y el porcentaje de fallos. Es obligatoria una secuencia mínima de cinco años consecutivos de datos para llevar a cabo estudios referentes a la regionalización de caudales (Paiva y Paiva, 2016). Se consideró el inicio del año hidrológico en enero y series históricas con un porcentaje de fallos menor al 5% (Costa et al., 2019).

La identificación de las fallas en la serie de datos se realizó mediante la herramienta de pre-procesamiento del Sistema Computacional para Análisis Hidrológicos (SisCAH). El SisCAH fue desarrollado por la Universidad Federal de Viçosa en conjunto con otros institutos brasileños. Es un software estructurado en módulos de procesamiento y análisis de series históricas de caudales, que utiliza como base de datos los archivos disponibles en HidroWeb (Sousa et al., 2009).

De esta manera, se identificaron las estaciones con información confiable y sólida, en las cuales se determinó el caudal  $Q_{95}$  y posteriormente se exportaron al Sistema Computacional SisCoRV para llevar a cabo la regionalización de los caudales (Cuadro N°1).

**Cuadro N°1.**

Estaciones fluviométricas seleccionadas en el estudio.

Estación (código)	Nombre de la estación	Latitud	Longitud	Cuenca	Intervalo de Datos
42250000	Fazenda Limoeiro	-17,915	-47,011	Paracatu	1974 - 2014
42251000	Fazenda Córrego do Ouro	-17,613	-46,859	Paracatu	1973 - 2014
42257000	Barra do Escurinho	-17,513	-46,646	Paracatu	1974 - 2014
42290000	Paracatu	-17,503	-46,571	Paracatu	1965 - 2014
42365000	Ponte da BR-040 - Prata	-17,662	-46,355	Paracatu	1976 - 2014
42395000	Santa Rosa	-17,255	-46,473	Paracatu	1955 - 2014
42435000	Fazenda Barra Da Égua	-16,874	-46,587	Paracatu	1974 - 2014
42440000	Fazenda Poçoões	-17,042	-46,819	Paracatu	1973 - 2014
42460000	Fazenda Limeira	-16,209	-47,233	Paracatu	1972 - 2014
42490000	Unai	-16,349	-46,88	Paracatu	1964 - 2014
42545002	Fazenda Roncador	-16,249	-46,8	Paracatu	1979 - 2014
42600000	Porto dos Poçoões	-16,84	-46,357	Paracatu	1956 - 2014
42690001	Porto da Extrema	-17,03	-46,014	Paracatu	1955 - 2014
42840000	Veredas	-18,139	-45,759	Paracatu	1973 - 2014
42850000	Cachoeira das Almas	-17,351	-45,533	Paracatu	1973 - 2014
42860000	Cachoeira do Paredão	-17,121	-45,436	Paracatu	1967 - 2014
42980000	Porto Alegre	-16,907	-45,383	Paracatu	1963 - 2014
43300000	Fazenda Carvalho	-15,524	-46,284	Urucuia	1973 - 2014
43360000	Piratinga	-15,031	-46,293	Urucuia	1999 - 2014
43429998	Arinos Montante	-15,918	-46,119	Urucuia	1977 - 2014
43670000	Vila Urucuia	-16,133	-45,742	Urucuia	1967 - 2014
43675000	Fazenda Conceição	-16,429	-45,74	Urucuia	1984 - 2014
43880000	Santo Inácio	-16,281	-45,414	Urucuia	1962 - 2014
43980002	Barra do Escuro	-16,268	-45,237	Urucuia	1986 - 2014
60020000	Ponte São Marcos	-17,03	-47,16	São Marcos	1967 - 2007
60030000	Campo Alegre de Goiás	-17,5	-47,56	São Marcos	1972 - 2007

Estación (código)	Nombre de la estación	Latitud	Longitud	Cuenca	Intervalo de Datos
60040000	Fazenda São Domingos	-18,11	-47,69	São Marcos	1969 - 2007
60050000	Davinópolis	-18,12	-47,62	São Marcos	1974 - 2006

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de la regionalización de caudales, se utilizó el software Sistema Computacional para Regionalización de Vazões (SisCoRV), desarrollado por la ANA en colaboración con la Universidad Federal de Viçosa. El software permite evaluaciones basadas en tres métodos principales: el tradicional, la curva adimensional y la conservación de masas (Sousa et al., 2009).

El método utilizado para la regionalización de caudales en este estudio fue el tradicional, que no depende de las variables físicas y climáticas de la cuenca hidrográfica (Sousa et al., 2009). Este método tiende a ser más utilizado debido a la facilidad de aplicación de las ecuaciones de regresión y a su mayor alcance en comparación con otros métodos (Bazzo et al., 2017).

La definición del caudal de referencia para la asignación parte de la estadística extraída del histórico de caudales del lugar de interés, y es establecida por los organismos gestores, que indicarán un porcentaje de este caudal de referencia que puede ser asignado para las asignaciones de uso de agua (ANA, 2019). En Minas Gerais, el caudal de referencia utilizado para el cálculo de las disponibilidades hídricas superficiales en todo el estado es el “caudal mínimo de siete días de duración y diez años de recurrencia ( $Q_{7,10}$ )”, y el caudal máximo que puede ser asignado para captaciones a flujo constante corresponde al 50% de  $Q_{7,10}$  (Decreto estatal IGAM N° 48) (IGAM, 2019). En el caso adoptado por la ANA, la disponibilidad en los tramos de río corresponde al caudal de referencia  $Q_{95}$ , es decir, el caudal que pasa por el río al menos el 95% del tiempo, y fija el límite máximo de hasta el 70% de este caudal para asignaciones de captación (ANA, 2019).

En este estudio, se utilizó el caudal de referencia  $Q_{95}$ . La elección de este caudal de referencia fue motivada por los ríos pertenecientes a la unión y a las tres subcuencas, ya que abarcan otro estado además de Minas Gerais, en este caso, el estado de Goiás, que también adopta el caudal de referencia  $Q_{95}$ . Como resultados, se obtuvieron los caudales mediante la aplicación de modelos de regresión lineal, potencial, exponencial, logarítmico y recíproco.

Con los caudales regionalizados, fue posible incorporarlos en la base hidrográfica otocodificada de la cuenca en estudio. El SisCoRV permite que cada tramo de la red de drenaje sea regionalizado de acuerdo con la ecuación propuesta, respetando su área de contribución (Sousa et al., 2009).

A continuación, se subdividieron las redes de drenaje correspondientes a las subcuencas en estudio según el área del municipio, y luego se insertaron los caudales  $Q_{95}$  de los tramos mencionados para analizar si cumplen con los requerimientos de los pivotes instalados. El consumo de cada pivote se calculó multiplicando el área del pivote por el consumo promedio de ( $0,52 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ), considerando que todos los pivotes cultivan maíz, como se mencionó anteriormente.

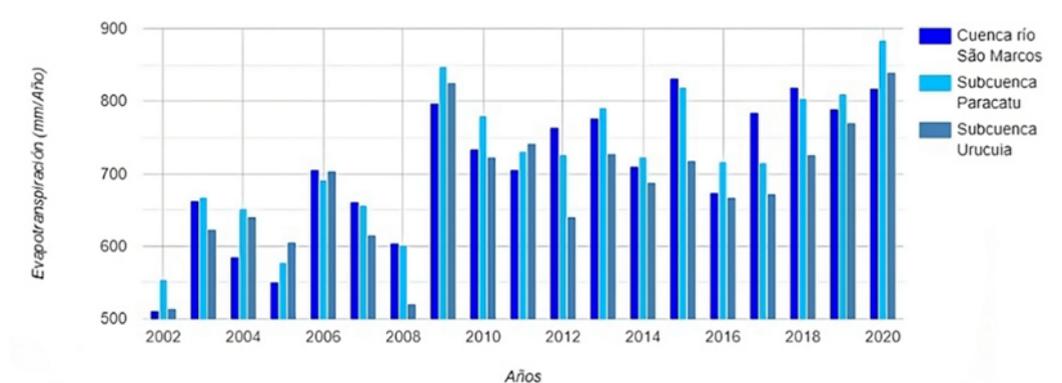
A través de imágenes de satélite, se identificó a qué curso hídrico está relacionado cada pivote, y luego se calculó la demanda de los pivotes en función de la disponibilidad hídrica del curso hídrico, generando así el porcentaje en el cual este recurso puede satisfacer las necesidades de los pivotes que requieren su caudal.

## Resultados

La Figura N°2 muestra la variación anual de la evapotranspiración regional para las tres cuencas de estudio. Es posible observar que hay una variación anual relacionada con la evapotranspiración, mostrando un aumento significativo a lo largo de los años. Recientemente, investigadores han demostrado que la ET ha aumentado a nivel global en un 10% entre 2003 y 2019 (Pascolini-Campbell et al., 2021). Esto se debe a las variaciones climáticas cada año (Running et al., 2019).

**Figura N°2.**

Datos de la evapotranspiración potencial en las tres cuencas que contribuyen con el régimen hídrico en el área de estudio, correspondientes al periodo de 2002 a 2020.



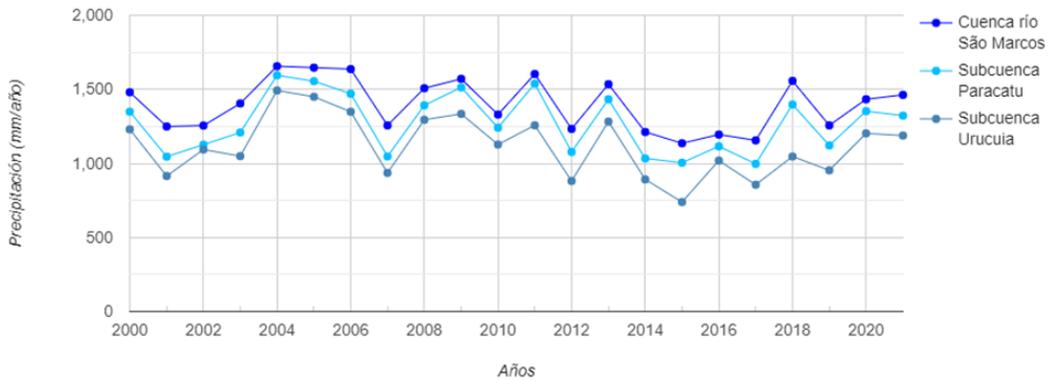
Fuente: Elaborado con datos del sensor MODIS (MOD16A2) en la plataforma Google Earth Engine (GEE).

Esta variable climática es esencial para la gestión de los recursos hídricos (Muhammad et al., 2019). El aumento de la ET llevará a un mayor consumo de agua del suelo e intensificará la sequía, resultando en una alta sensibilidad ecológica y una grave vulnerabilidad en regiones con limitaciones de agua (Wang et al., 2022). Este aumento, sin embargo, ya se siente en el área de estudio, los recursos hídricos superficiales se han reducido gradualmente y los productores lo han sentido.

La Figura N°3 muestra la evolución de la precipitación media anual regional para las tres cuencas. Se observa que la precipitación media anual presenta una fuerte variabilidad interanual, variando de ~738 a >1656 mm año<sup>-1</sup>. En regiones de Cerrado, donde se encuentra ubicada el área de estudio, los años de precipitación individuales varían desde valores típicos del clima semiárido en el este de la región hasta valores típicos del clima tropical estacionalmente seco en el oeste de la región (Pousa et al., 2019).

**Figura N°3.**

Precipitación media anual para las tres cuencas, correspondiente al período de 2000 a 2020.

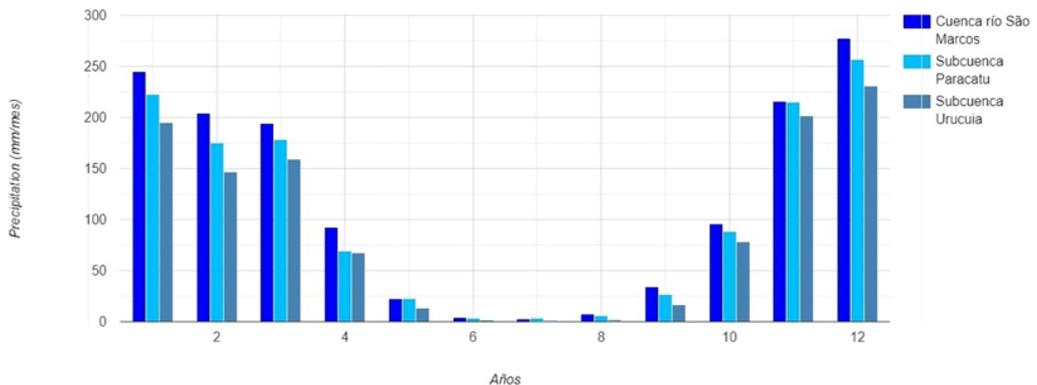


Fuente: Elaborado con datos (UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY) en la plataforma Google Earth Engine (GEE).

La precipitación en las cuencas que contribuyen al área de estudio está bien definida, y se puede afirmar que los períodos de sequía corresponden a los meses entre mayo y septiembre, mientras que los períodos de lluvia ocurren entre octubre y abril (Figura N°4). Durante el período de lluvias, pueden ocurrir intensos períodos de sequía, llegando hasta 26 días sin precipitación (Xavier et al., 2016). Este hecho hace que la irrigación sea cada vez más utilizada en la región, para mitigar la falta de precipitación y promover la productividad de los cultivos.

**Figura N°4.**

La precipitación acumulada mensual (mm mes<sup>-1</sup>) en el municipio de Unai, correspondiente al período de 2000 a 2020.



Fuente: Elaborado con datos (UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY) en la plataforma Google Earth Engine (GEE).

Al analizar la precipitación media acumulada mensual entre el período de 2000 a 2020, obtenida con los productos CHIRPS, se observa que el promedio mensual entre las cuencas que contribuyen al área de estudio varió entre 0,7 mm en julio y 256,6 mm en diciembre, contribuyendo a una precipitación media anual de 1.178,3 mm.

Con base en los datos presentados y aplicando la ecuación de retirada de agua para la irrigación, se estimó el consumo promedio por hectárea irrigada a través de pivotes centrales con la cultura del maíz safrinha, considerando el plantío en el mes de marzo y la cosecha en julio. Se observa que el promedio encontrado corresponde a  $4,47 \text{ mm día}^{-1}$ , lo que resulta en una demanda específica de  $0,52 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  (Cuadro N°2).

#### Cuadro N°2.

Demanda hídrica para el cultivo del maíz segunda cosecha durante un período de 100 días de riego (del 25 de marzo al 3 de julio).

Unidad	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Media
$\text{mm día}^{-1}$	0,61	3,38	6,67	7,51	4,18	4,47
$\text{L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$	0,07	0,39	0,77	0,87	0,48	0,52

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de las isolinhas para el cultivo del maíz safrinha en la porción del Distrito Federal y Goiás dentro de la Cuenca del río São Marcos describió una necesidad de riego entre  $3,2 \text{ mm día}^{-1}$  y  $4,4 \text{ mm día}^{-1}$ , utilizando la metodología tradicional de estimación y datos del Instituto Nacional de Meteorología (INMET) (Oliveira y Silva, 2009). Esta lámina es cercana al promedio encontrado en este estudio, demostrando el buen rendimiento de los datos provenientes de las imágenes de satélite utilizadas para el cálculo de la demanda hídrica en el municipio de Unai.

El cultivo del maíz demanda un consumo hídrico que varía entre 350 mm y 600 mm durante todo su ciclo, dependiendo de las condiciones climáticas locales donde se cultiva y de la frecuencia de riego (Embrapa, 2011). En la simulación para el área de estudio, el maíz safrinha necesita una demanda hídrica de 549,67 mm durante todo su ciclo.

Por lo tanto, el consumo de cada pivote central se calculó multiplicando el área en hectáreas irrigadas por el consumo medio de  $0,52 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ . En consecuencia, se estima que el consumo medio instantáneo de todos los pivotes instalados en Unai durante el mes de junio equivale a  $35,81 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $0,52 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1} \times 68.872 \text{ ha}$ ).

Mediante el Sistema Computacional SisCAH, se analizaron las series históricas de caudales de las estaciones fluviométricas identificadas como adecuadas para el estudio, lo cual permitió obtener la curva de permanencia relacionada con cada estación, lo que a su vez permitió extraer el caudal con un 95% de permanencia en el tiempo ( $Q_{95}$ ).

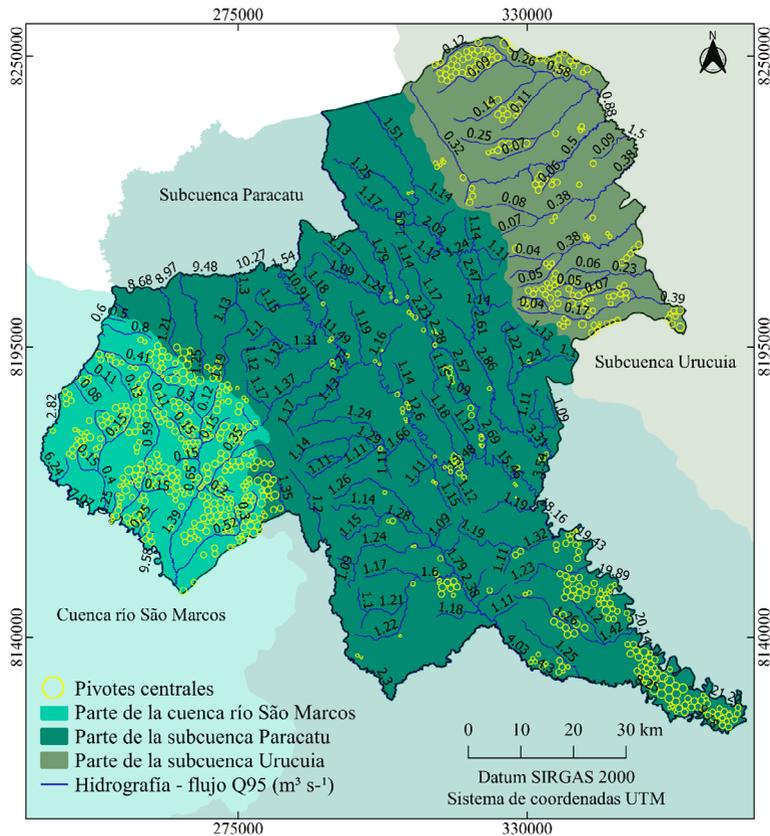
Una vez insertados los datos de entrada en SisCoRV, se llevó a cabo el proceso de regionalización de caudales y se observó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de los modelos de regresión con el objetivo de seleccionar la mejor opción que satisficiera los caudales correspondientes al área de estudio.

Después de la regionalización de los caudales mediante el modelo de regresión con mejor ajuste para cada subcuenca en estudio, se insertaron en la base hidrográfica otocodificada y regionalizada para cada tramo de drenaje (Figura N°5), que luego fue seccionada por los límites del municipio de Unai, adoptando para el estudio el caudal regionalizado  $Q_{95}$ . Se observa que los

caudales más favorables se concentran en el tramo de la subcuenca Paracatu, siendo el caudal más bajo de  $1,07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , en comparación con el tramo de la subcuenca Urucuia, cuyo caudal más bajo es de  $0,03 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , así como la cuenca del río São Marcos, siendo el caudal más bajo de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Es importante destacar que la identificación visual de los pivotes centrales en actividad en el municipio de Unai en el año 2019 mostró 798 puntos de pivote, donde el 44,1% de estos se concentran en el tramo de la cuenca del río São Marcos, el 33,6% se distribuyen en el tramo de la subcuenca Paracatu y el resto de los pivotes, aproximadamente el 22,3%, están presentes en áreas del tramo de la subcuenca Urucuia. Es decir, el 15,5% del municipio (tramo de la cuenca del río São Marcos) concentra la mayor parte de los pivotes, mientras que el 64,3% del área del municipio (tramo de la subcuenca Paracatu), cuyo caudal es más favorable para el riego, solo alberga el 36,6% de los pivotes instalados, los demás pivotes (22,3%) se concentran en el tramo de la subcuenca Urucuia, correspondiente al 20,2% del área de Unai.

**Figura N°5.**

Regionalización de los caudales  $Q_{95}$  para cada tramo de drenaje.

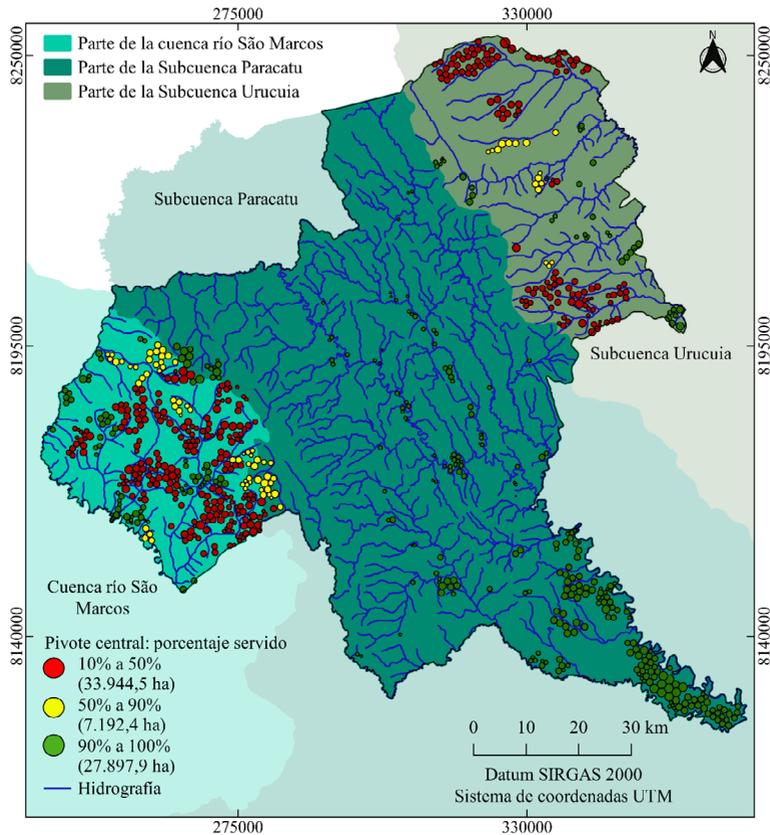


Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la utilización del caudal mínimo de referencia adoptado genera un déficit en la irrigación (Figura N°6), mostrando que el 55,4% de los pivotes tienen un porcentaje de cumplimiento de la necesidad hídrica por debajo del 90%, y evaluando de forma más restrictiva, el 45,5% están por debajo del 50%.

**Figura N°6.**

Balance hídrico utilizando la disponibilidad hídrica  $Q_{95}$  y la demanda de los pivotes centrales, considerando el cultivo de maíz en la temporada de invierno.



Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el tramo de la subcuenca Paracatu se presenta como el área con mejor potencial para la implementación del sistema de riego en estudio, ya que presenta mejores caudales en sus cursos de agua y, además, tiene una menor concentración de pivotes instalados en relación con su área total.

## Discusión

El balance hídrico para el área de estudio se realizó considerando el 70% del caudal  $Q_{95}$ , siendo el resultado entre la demanda necesaria para cultivar maíz en todos los pivotes de la cosecha de invierno y la oferta de agua mínima garantizada en el 95% del tiempo, sin considerar la influencia de los embalses en el aumento de la oferta de agua. Por lo tanto, ante este escenario hipotético, con todos los pivotes cultivando maíz en la temporada de invierno, se obtuvo que el 40% del área irrigada tiene cubierta la demanda hídrica (Figura N°6). Se destaca que, en la realidad, el riego se realiza para una variedad de cultivos con necesidades hídricas inferiores a las del maíz, es decir, una situación más favorable de lo que el estudio evalúa. En el municipio se riega: soja, frijol, maíz,

café, entre otros cultivos (ANA, 2021). Además, es común que los agricultores dejen algunos pivotes sin actividad en esta época del año.

Debido a la disminución de las lluvias y de los recursos hídricos (Pascolini-Campbell et al., 2021), los límites de concesión de recursos hídricos (70% de  $Q_{95}$ ) pueden alcanzarse con mucha más frecuencia de lo previsto si no se utilizan información hidroclimática actualizada. La combinación de un fuerte aumento en la demanda de agua para el riego y el mantenimiento de caudales bajos (Figura N°5) puede traer consecuencias críticas para la gestión hídrica de la región en los próximos años. Según la ANA (2020), los conflictos por el uso del agua durante la estación seca y, en particular, en años de sequía prolongada en la región donde se encuentra la zona de estudio, ya han causado disputas entre los agricultores y las comunidades ribereñas. Los registros muestran que estos conflictos han estado ocurriendo durante más de 20 años (IGAM, 2020).

El estrés hídrico que enfrenta la agricultura global requiere una intervención científica para desarrollar soluciones a este problema, con el fin de garantizar la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible (Ahansal et al., 2022). En este contexto, este trabajo es un intento de diagnosticar y monitorear el agua utilizada para el riego y el consiguiente estrés hídrico en una región con un intenso crecimiento del riego por pivote central, proponiendo un modelo que pueda hacer que los gestores miren el uso del agua de manera más racional.

Con el desarrollo económico y social y el crecimiento de la población, el problema de la escasez de recursos hídricos se está volviendo cada vez más prominente (Cao et al., 2021). La distribución espacial y temporal desequilibrada de los recursos hídricos en la Subcuenca Urucuia y en la Cuenca São Marcos (Figura 6) muestra una situación más crítica en el área de estudio, donde los agricultores ya trabajan bajo estrés hídrico.

La gestión de los recursos hídricos basada en la probabilidad de eventos hidroclimático a largo plazo requiere una actualización constante de los bajos valores de caudal que se otorgan (Pousa et al., 2019). El área de estudio (Figura N°1) es una frontera agrícola en constante cambio, está ubicada en el bioma Cerrado en el Centro-Oeste de Brasil y carece de información para la gestión. Por lo tanto, un manejo en el cual la disponibilidad y la demanda de recursos hídricos para el riego sean efectivamente medidas y monitoreadas sería el camino más seguro para proporcionar seguridad hídrica a esta región.

## Conclusiones

Basándonos en el análisis de los datos de evapotranspiración, precipitación, demanda de agua para el cultivo de maíz de segunda cosecha y caudales de ríos en la zona de estudio, se puede concluir que la gestión de los recursos hídricos en esta región enfrenta desafíos significativos y potencialmente críticos. El uso racional del agua y la promoción de la eficiencia en la irrigación son cruciales para mitigar los desafíos que enfrenta la agricultura en la región y garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

Los caudales de los ríos en la región varían considerablemente, con algunas áreas teniendo caudales más favorables que otras. La subcuenca del Paracatu se destaca como un área con un

mejor potencial para la irrigación, mientras que otras subcuencas, como Urucuia, enfrentan limitaciones significativas.

La observación de un aumento significativo en la evapotranspiración a lo largo de los años es un indicador preocupante. Este aumento, posiblemente relacionado con los cambios climáticos, aumenta la demanda de agua en el suelo y agrava la sequía, especialmente en áreas que ya tienen limitaciones en los recursos hídricos. Dado que la concentración de sistemas de riego por pivote central en áreas específicas, junto con el aumento en la demanda de agua, ejerce presión sobre los recursos hídricos locales. Esta presión puede dar lugar a conflictos por el uso del agua y la posibilidad de exceder los límites de las concesiones de derechos de uso establecidos.

Teniendo en cuenta el cambio climático y la continua expansión de la agricultura irrigada, es esencial que la gestión de los recursos hídricos sea adaptable y se base en información hidroclimática actualizada. La escasez de agua podría convertirse en un problema crítico en el futuro, afectando no solo a la agricultura, sino también a la seguridad hídrica de la región.

## *Agradecimientos*

Agradecemos a la Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), al Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal (PPGPV) y al grupo de Geotecnologias Aplicadas (GeoTec).

## **Referencias**

ANA. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. In: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Brasília: ANA, 2021. Disponible en Internet: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1b19cbb4-10fa-4be4-96dbb3dcd8975db0>

ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: informe anual. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2022.

ANA. Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2019.

ANA. Polos nacionais de agricultura irrigada: mapeamento de áreas irrigadas com imagens de satélite. ANA, Brasília, 2020.

ANA. Resolução no 707, de 21 de dezembro de 2004. Disponible en Internet: <https://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2004/707-2004.pdf>.

AHANSAL, Y.; BOUZIANI, M.; YAAGOUBI, R.; SEBARI, I.; SEBARI, K. & KENNY, L. Towards Smart Irrigation: A Literature Review on the Use of Geospatial Technologies and Machine Learning in the Management of Water Resources in Arboriculture. *Agronomy*, 2022; Vol.12, Nº2, 297. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020297>

AMANI, M.; GHORBANIAN, A.; AHMADI, S. A.; KAKOOEI, M.; MOGHIMI, A.; MIRMAZLOUMI, S. M.; MOGHADDAM, S. H. A.; MAHDAVI, S.; GHAHREMANLOO, S. & PARSIAN, S. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, Vol.13, p. 5326–5350. doi: 10.1109/JSTARS.2020.3021052

BAZZO, K. R. GUEDES, H. A. S. CASTRO, A. S. SIQUEIRA, T. M. & TEIXEIRA-GANDRA, C. F. A. Regionalização da vazão  $Q_{95}$ : comparação de métodos para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 2017, Vol. 12, Nº. 5, p. 855. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2032>

CAO, M.; WANG, W.; XING, W.; WEI, J.; CHEN, X.; LI, J. & SHAO, Q. Multiple sources of uncertainties in satellite retrieval of terrestrial actual evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 2021, Vol.601, p. 126642. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126642>,

COSTA, E. S.; SALLA, M. R.; PEREIRA, C. E. & LIMA, G. Otimização do aproveitamento hídrico superficial no alto curso do rio Uberaba, Triângulo Mineiro. *Sociedade & Natureza*, 2019, Vol.31, p. e41033. doi.: <http://dx.doi.org/10.14393/SN-v31-2019-41033>

CUNHA, B. A.; NEGREIROS, M. M.; ALVES, K. A. & TORRES, J. P. Influência da época de semeadura na severidade de doenças foliares e na produtividade do milho safrinha. *Summa Phytopathologica*, 2019, Vol.45, Nº4, p. 424-427. doi.org/10.1590/0100-5405/188038

EMBRAPA. Milho: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011.

EPAMIG. Solos e avaliação do potencial agrossilvipastoril das microrregiões Paracatu e Unai - Minas Gerais. Belo Horizonte: Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, 2014.

FAO. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. Rome: FAO, 2021. doi.org/10.4060/cb7654en

FJP. Diretoria de Estatística e Informações Produto Interno Bruto dos municípios de Minas Gerais: ano de referência 2020. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 2023.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A. & JOEL MICHAELSEN. The climate hazards infrared precipitation with stations a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2015, Vol.2, Nº1, p.150066. doi.org/10.1038/sdata.2015.66

IBGE. IBGE cidades / Unai. Disponível em Internet: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/unai/panorama>.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA, 2023. Disponível em Internet: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>

IGAM. Áreas de Conflito Declaradas em Minas Gerais - 2020. Disponible en Internet: <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/3064?mode=full>. Accessed 16 septiembre 2023.

IGAM. Manual técnico e administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos no estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: IGAM, 2010. Disponible en Internet: <http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/864>

IGAM. PORTARIA IGAM Nº48, de 04 de outubro de 2019. Disponible en Internet: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49719>.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B. & RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol*, 2006; vol.15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130

LIMA, E. P.; ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G. C. & BOF, L. H. N. Temporal-spatial Control of the difference between Precipitation and Evapotranspiration in Paracatu Sub-basins. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 2019, Vol.6, Nº.6, p. 617-622. 10.22161/ijaers.6.6.70

MAPBIOMAS. Coleção 7.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. 2023. Disponible en Internet: <https://mapbiomas.org/download>

MPANDELI, S.; NHAMO, L.; MOELETSI, M.; MASUPHA, T.; MAGIDI, J.; TSHIKOLOMO, K.; LIPHADZI, S.; NAIDOO, D. & MABHAUDHI, T. Assessing climate change and adaptive capacity at local scale using observed and remotely sensed data. *Weather and Climate Extremes*, 2019, Vol.26, p. 100240. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100240>

MUHAMMAD, M. K. I.; NASHWAN, M. S.; SHAHID, S.; ISMAIL, T. B.; SONG, Y. H. & CHUNG, E. S. Evaluation of Empirical Reference Evapotranspiration Models Using Compromise Programming: A Case Study of Peninsular Malaysia. *Sustainability*, 2019; Vol.11, Nº16, 4267. <https://doi.org/10.3390/su11164267>

NORTON, C. L.; DANNENBERG, M. P.; YAN, D.; WALLACE, C. S. A.; RODRIGUEZ, J. R.; MUNSON, S. M.; VAN LEEUWEN, W. J. D. & SMITH, W. K. Climate and socioeconomic factors drive irrigated agriculture dynamics in the lower Colorado river basin. *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Nº.9, p.1659. <https://doi.org/10.3390/rs13091659>

OLIVEIRA, L. F. C.; & SILVA, M. A. S. Regionalização da lâmina suplementar de irrigação e época de semeadura do milho no estado de Goiás e Distrito Federal. *Bioscience Journal*, 2009, Vol. 25, Nº4, p. 43-52.

PAIVA, J. B. D.; & PAIVA, E. M. C. D. DE. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2016.

PASCOLINI-CAMPBELL, M., REAGER, J. T., CHANDANPURKAR, H. A. & MATTHEW RODELL. Retracted article: A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019. *Nature*, 2021, Vol.593, p.543-547. doi. 10.1038/s41586-021-03503-5

POUSA, R.; COSTA, M. H.; PIMENTA, F. M.; FONTES, V. C.; BRITO, V. F. A. D. & CASTRO, M. Climate Change and Intense Irrigation Growth in Western Bahia, Brazil: The Urgent Need for Hydroclimatic Monitoring. *Water*, 2019; Vol.11, Nº5, 933. doi. <https://doi.org/10.3390/w11050933>

RAMACHANDRAN, V.; RAMALAKSHMI, R.; KAVIN, B. P.; HUSSAIN, I.; ALMALIKI, A. H.; ALMALIKI, A. A.; ELNAGGAR, A. Y. & HUSSEIN, E. E. Exploiting IoT and Its Enabled Technologies for Irrigation Needs in Agriculture. *Water*, 2022; Vol.14, Nº5, 719. doi. <https://doi.org/10.3390/w14050719>

SILVA, D. V.; CUNHA, F. F.; VICENTE, M. R.; ALENCAR, C. A. B.; SOUZA, I. P. Análise de precipitação, balanço hídrico climatológico e classificação climática no município de Unaí-MG. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, 2017; vol. 8, nº1, 68-82.

