

RIESGO DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO DUAS BOCAS (ES)

Flood Risk in the Watershed of the Duas Bocas River (ES)

Eberval Marchioro | Universidade Federal do Espírito Santo | ebervalm@gmail.com
Thaíssa Gomes Dias da Silva | Universidade Federal do Espírito Santo | thaissa.g.silva@edu.ufes.br
Alanderson Gomes de Souza | Universidade Federal do Espírito Santo | alandersonsouza18@gmail.com
Pablo Medeiros Jabor | Instituto Jones dos Santos Neves | pmjabor@gmail.com
Pablo Lira Silva | Instituto Jones dos Santos Neves | pabloslira@gmail.com

RESUMEN: Las inundaciones constituyen un fenómeno natural recurrente en diversas regiones del mundo. El presente estudio tiene como objetivo identificar y analizar las áreas de riesgo de inundación en la cuenca hidrográfica del río Duas Bocas, en la Región Metropolitana de Grande Vitória (ES, Brasil). Para ello, se empleó el modelo *Altura Sobre el Drenaje Más Cercano*, en conjunto con un Modelo Digital del Terreno con resolución espacial de 2 metros. La red de drenaje fue extraída a partir de un umbral de acumulación de flujo de 5000, valor que mostró mayor precisión en relación con el drenaje observado, siendo fundamental para la delimitación de las áreas susceptibles a inundaciones. El riesgo fue clasificado en cinco categorías: muy alto, alto, moderado, bajo y muy bajo, considerando la extensión de las áreas afectadas en relación con el cauce del río. Los resultados indican que el 27,47% de la cuenca presenta algún nivel de riesgo de inundación, destacándose las categorías "muy alto" y "alto", que concentran la mayor proporción de áreas susceptibles. En contraste, las áreas de riesgo muy bajo predominan en regiones con cobertura natural. La población se concentra principalmente en zonas de menor riesgo. Ante la expansión urbana, resulta fundamental incorporar medidas de planificación territorial para reducir impactos y vulnerabilidades.

PALABRAS CLAVES: Hidrogeomorfología – Ríos – HAND

RESUMO: As inundações são um fenômeno natural recorrente em diversas regiões do mundo. Este estudo tem como objetivo identificar e analisar as áreas de risco de inundação na bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, na Região Metropolitana da Grande Vitória (ES, Brasil). Para isso, foi utilizado o modelo *Altura sobre a Drenagem Mais Próxima*, em conjunto com um Modelo Digital do Terreno com resolução espacial de 2 metros. A rede de drenagem foi extraída com base em um limiar de acumulação de fluxo de 5000, valor que apresentou maior precisão em relação à drenagem observada, sendo essencial para a delimitação das áreas suscetíveis a inundações. O risco foi classificado em cinco categorias: muito alto, alto, moderado, baixo e muito baixo, considerando a extensão das áreas afetadas em relação ao curso do rio. Os resultados indicam que 27,47% da bacia apresenta algum nível de risco de inundação, com destaque para as classes muito alto e alto, que concentram a maior parte das áreas suscetíveis. Em contraste, áreas de risco muito baixo predominam em regiões com cobertura natural. A população concentra-se principalmente em áreas de menor risco. Diante da expansão urbana, é essencial incorporar medidas de planejamento territorial para reduzir impactos e vulnerabilidades.

KEY WORDS: Hidrogeomorfologia – Rios – HAND

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son un proceso natural que varía en términos de magnitud y frecuencia, como resultado de la interrelación entre la precipitación pluvial, el relieve y la forma en que las civilizaciones humanas se apropian del espacio geográfico (Bierman & Montgomery, 2019; Christofoletti, 1981).

Este proceso desempeña funciones hidrogeomorfológicas, sedimentológicas y ecológicas importantes, es decir, geohidroecológicas, contribuyendo a la calidad ambiental de la cuenca hidrográfica. Por ello, su análisis se centra en su continuidad en el tiempo, porque su desaparición impactaría directamente el equilibrio geohidroecológico de un determinado territorio o unidad geomorfológica (Disse et al., 2020; Saharia et al., 2017).

Así, al ser un fenómeno natural que ocurre en el paisaje, las inundaciones son responsables de la autorregulación del ambiente, ya que utilizan sus propios mecanismos de distribución de materia y disipación de energía; construyen y dimensionan los ríos; y controlan, dirigen y favorecen todos los procesos geohidroecológicos a través de la conectividad longitudinal, vertical y lateral de los cursos fluviales (Brierley et al., 2006; Kindlmann & Burel, 2008).

A pesar de su relevancia natural para las sociedades desde los inicios de la vida humana en la Tierra, como se observa, por ejemplo, en la fertilización natural de las llanuras fluviales del río Nilo en Egipto, en la actualidad ha sido considerada un problema ambiental para nuestra civilización. Esto se debe a la ocupación de áreas de riesgo de inundación, entendido el *riesgo* como el resultado de la interacción entre un peligro (como inundaciones, huracanes o terremotos) y la vulnerabilidad del sistema o elemento expuesto, incluyendo la probabilidad de ocurrencia del fenómeno peligroso (Birkmann, 2013). Esta ocupación ha expuesto a las poblaciones a peligros significativos y ha generado impactos, comúnmente denominados “*desastres naturales*”, esto es, la ocurrencia de fenómenos naturales que modifican la superficie terrestre y afectan áreas o regiones habitadas, causando daños materiales y humanos (Amaral & Gutjahr, 2015). Sin embargo, en este contexto se definen como “*desastres ambientales*”: fenómenos naturales que modifican las formas del relieve terrestre, intensificados por las actividades humanas y capaces de causar daños materiales y socioeconómicos (Gutiérrez, 2014).

Como consecuencia de este proceso, se ha registrado un aumento en el número de personas afectadas por las inundaciones, lo que generalmente genera grandes pérdidas socioeconómicas y de vidas humanas, afectando principalmente a comunidades carentes de servicios de infraestructura urbana y drenaje (Parkinson et al., 2003).

En América Latina, la inundación es el fenómeno más frecuente y, desde el año 2000 hasta el 2019, ha causado casi 26.000 millones de dólares en daños totales, con un número total de 41 millones de personas afectadas por 548 inundaciones. Brasil, debido a sus características naturales (geología, hidrología, biogeografía y edafología) y a su extensión territorial, se encuentra entre los 15 principales países del mundo con la mayor población expuesta a inundaciones (United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs [OCHA], 2020).

En el estado de Espírito Santo no es diferente, ya que se han registrado diversos eventos de inundación en distintas partes del territorio capixaba. Estos eventos están asociados a las características del relieve (Marchioro & Coutinho, 2021), al clima y al uso y cobertura del suelo (Marchioro et al., 2016), lo que ha ocasionado pérdidas socioeconómicas y de vidas humanas (Agência Nacional de Águas [ANA], 2014).

Ante lo expuesto, y considerando el escenario actual de cambio climático y las transformaciones en el uso y cobertura del suelo promovidas por la acción humana a lo largo del tiempo histórico, se destaca el aporte de los estudios mediante modelos matemáticos de base física, como el modelo de Altura Sobre el Drenaje Más Cercano o *Height Above the Nearest Drainage* (HAND), propuesto por Nobre et al. (2011; 2016).

Este enfoque contribuye al avance en los estudios sobre el proceso de inundación en el territorio capixaba, ayudando a minimizar las pérdidas socioeconómicas y humanas. En este marco, el presente trabajo se propone identificar y analizar las áreas de riesgo de inundación y clasificar los grados de riesgo y la población afectada por el proceso de inundación en la cuenca hidrográfica del río Duas Bocas, en la Región Metropolitana de Grande Vitória (ES). Los resultados aportan insumos técnicos para el diseño de políticas públicas de ordenamiento y gestión territorial en cuencas urbanas, en particular para la delimitación de zonas de restricción, la planificación del uso del suelo y el desarrollo de medidas adaptativas y preventivas frente a eventos de inundación.

Área de estudio

La cuenca hidrográfica del río Duas Bocas (CHRDB) se encuentra localizada en la Región Metropolitana de Grande Vitória (RMGV), en el estado de Espírito Santo (Brasil), situándose entre las coordenadas 20°12'01.28" S / 40°23'06.35" O (7764921N355302E) y 20°17'24.90" S/40°32'07.88" O (7755681N/339683E) (Figura 1) (Marchioro & Ollero, 2023).

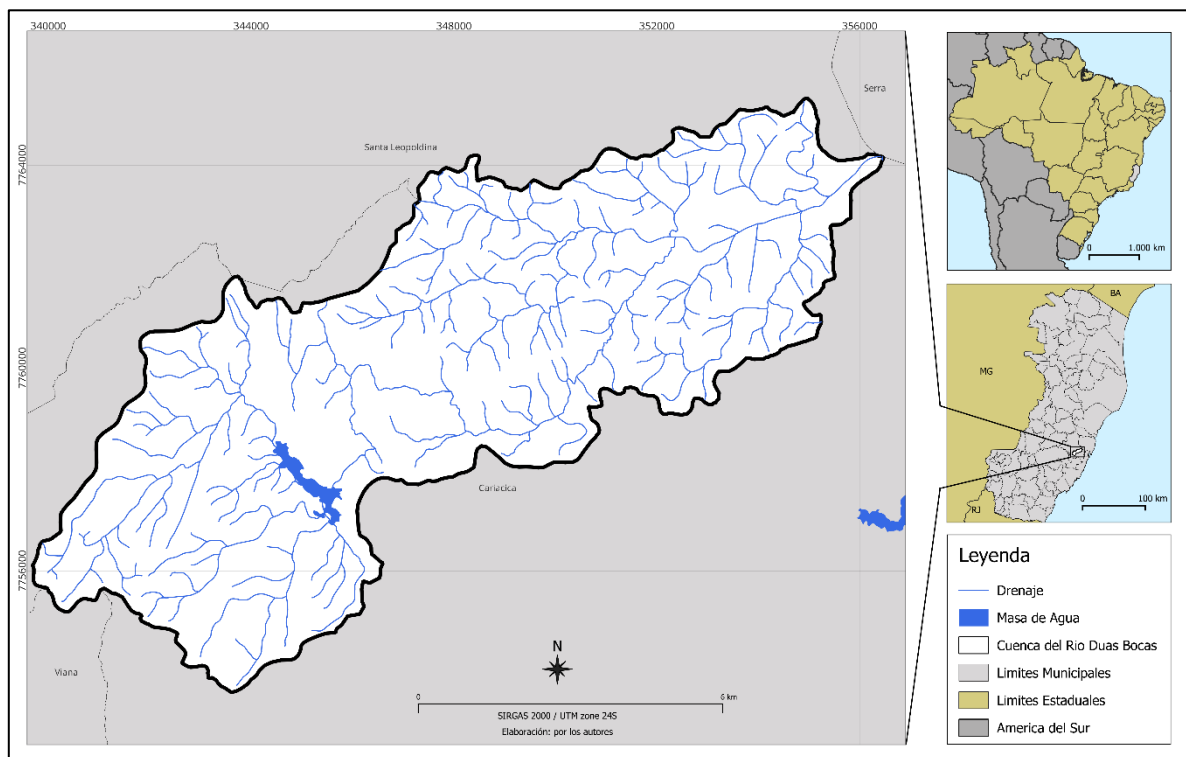


Figura 1: Ubicación de la cuenca hidrográfica del río Duas Bocas (ES/Brasil).

Fuente: Elaboración propia.

La CHRDB es una subcuenca del río Santa María da Vitória, utilizada para el abastecimiento de agua de la RMGV, con una superficie total de 82,83 km², abarcando los municipios de *Cariacica* (70,54 km²), *Santa Leopoldina* (12,24 km²) y *Viana* (0,05 km²) (Lemos et al., 2023). Según Santos y Marchioro (2018), los principales arroyos formadores de la CHRDB son *Pau Amarelo*, *Naia-Assú*, *Panelas* y *Sertão Velho*.

Bastos et al. (2015) elaboraron un estudio sobre el ritmo de la precipitación pluviométrica basado en la normal climatológica de 1983-2013 para la CHRDB, en el que constataron una variación pluviométrica de 1.307 a 1.656 milímetros, con mayor volumen entre noviembre y enero, y menor volumen entre junio y agosto.

La temperatura de la CHRDB está influenciada por la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) y por la Masa de Aire Polar, lo que provoca cambios en las condiciones atmosféricas

(Mattiuzzi & Marchioro, 2012; Marchioro et al., 2016), con una temperatura promedio en la cuenca hidrográfica de 24°C, alcanzando hasta 33°C en verano.

El área de estudio está constituida geológicamente por las unidades del *Complejo Nova Venécia*, *Macizo Granítico Vitória*, *Grupo Barreiras* y Depósitos Fluvio-lagunares (Fortes et al., 2014). La CHRDB comprende geomorfológicamente los Patamares Escalonados del Sur Capixaba, *Colinas y Macizos Costeiros*, *Tableros Costeiros* y la Llanura fluvio-lagunar (IJSN, 2012) (Figura 2).

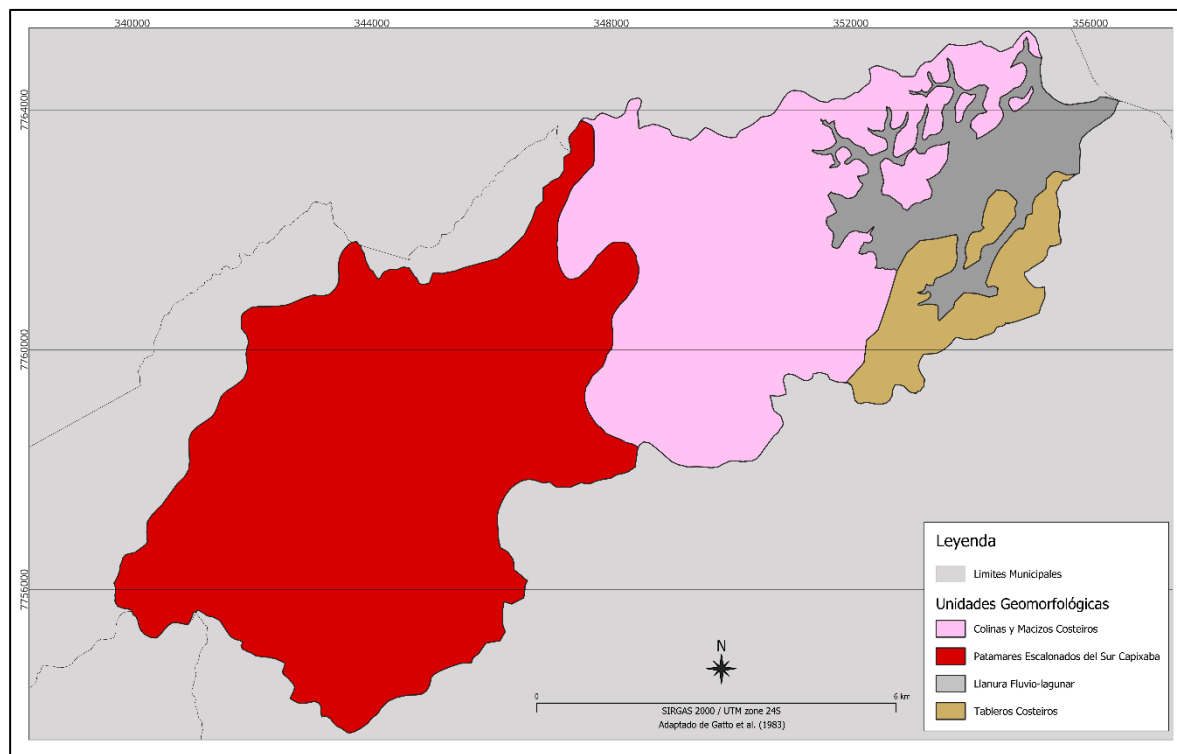


Figura 2: Distribución geográfica de las unidades geomorfológicas en la CHRDB (ES/Brasil).

Fuente: Adaptado de Gatto et al. (1983)

El marco pedológico de la cuenca incluye las siguientes clases de suelos: Argissolo Amarelo Distrófico típico, Latossolo Amarelo Distrófico típico, la asociación entre Latossolo Amarelo Distrófico típico y Latossolo Amarelo Distrófico Ácrico Húmico, Cambissolo Háplico Distrófico típico, Gleissolo Distrófico típico y Neossolo Litólico Distrófico típico (Cunha et al., 2016).

Según Santos y Marchioro (2018), la CHRDB ha atravesado un proceso de transformación en su uso y cobertura de la tierra, con la expansión de las áreas de pastoreo y agricultura, lo que ha incrementado las zonas de fragilidad ambiental y la producción de sedimentos. Sin embargo, en la cabecera de la cuenca, la Mata Atlántica predomina, y los arroyos no han sido afectados, ya que se encuentran dentro de la Reserva Biológica Duas Bocas (ReBio).

Como reflejo del proceso de expansión urbana a lo largo del río principal y sus afluentes, la CHRDB ha sido objeto de construcciones de represas, puentes, presas y sedimentación, lo que, según Marchioro y Ollero (2023), ha promovido la disminución de su calidad hidrogeomorfológica, deteriorando su capacidad para ejercer su función geohidroecológica.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este estudio se eligió la cuenca hidrográfica del río Duas Bocas por ser una cuenca experimental, estratégica y representativa de los procesos hidrogeomorfológicos de las cuencas hidrográficas en tierras capixabas, como se puede observar en algunos trabajos ya

publicados en el área, como los de Delazari-Barroso et al. (2007), Kiffer et al. (2020), Lemos et al. (2023), Marchioro y Barroso (1996), Marchioro y Ollero (2023).

La identificación y predicción de las áreas riesgo a inundación son esenciales para la gestión del territorio. En este sentido, para la CHRDB se utilizó el modelo denominado Altura Sobre el Drenaje Más Cercano o *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) propuesto por Nobre et al. (2011; 2016), ya que permite contribuir a la comprensión del proceso de inundación en regiones con unidades geomorfológicas distintas y amplias llanuras fluvio-lagunares, como se ha verificado en la cuenca del río Duas Bocas (ES).

Base de datos cartográficos y poblacionales

El modelo digital del terreno (MDT) con resolución espacial de 2 m utilizado para este trabajo, está disponible en el marco del Proyecto Mapeamento-ES de 2012-2015, contratado por el Instituto Estatal de Medio Ambiente (IEMA)¹.

El plan de información cartográfica sobre el uso y cobertura del suelo para el año 2019-2020, el más actualizado para el Estado de Espírito Santo, está disponible de forma gratuita en el sitio web del Instituto Jones dos Santos Neves².

Los datos poblacionales de las áreas de riesgo de inundación fueron obtenidos a partir del Censo Demográfico de 2022, proporcionado por el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE). El conteo de viviendas se realizó mediante la suma directa de los puntos georreferenciados dentro de la cuenca, utilizando las coordenadas de las viviendas y los sectores censales. La estimación poblacional, por su parte, se obtuvo a partir del recorte de los 27 sectores censales que abarcan la cuenca hidrográfica, considerando el porcentaje de viviendas ubicadas dentro del área y manteniendo la proporcionalidad de la población de los respectivos sectores.

Aunque los límites de los sectores censales no coinciden exactamente con los límites hidrográficos de la cuenca, la metodología empleada permitió una aproximación realista y coherente de la distribución poblacional, garantizando una mayor precisión en la identificación de las áreas de riesgo de inundación y en la cuantificación de la población potencialmente afectada.

El modelo Altura Sobre el Drenaje Más Cercano (Height Above the Nearest Drainage - HAND)

El modelo de la Altura Sobre el Drenaje Más Cercano o *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) fue desarrollado por un grupo de investigadores del LBA, sigla en inglés para el Programa de Gran Escala de la Biosfera-Atmósfera en la Amazonía, en su versión HAND Contour, por Nobre et al. (2011; 2016).

Este modelo matemático de bases físicas tiene en cuenta el modelo digital del terreno o de elevación para generar un modelo digital hidrológico “que representa literalmente la altura del drenaje más cercano, lo que en la práctica significa una altimetría normalizada en relación con la red de drenaje del área de estudio” (Milanesi et al., 2017, p. 676). Así, las áreas con mayor riesgo de inundación son aquellas con el valor de píxel más bajo, que generalmente están más cercanas a los cauces de la red de drenaje (Rennó et al., 2008).

El modelo HAND normaliza la topografía en relación con la red de drenaje en dos etapas. La primera etapa construida a partir de un modelo digital del terreno o de elevación (MDT o MDE) con topografía hidrológica parcialmente incongruente y depresiones (sumideros), se definen los caminos de flujos, que se corrigen a través de la ruptura de las depresiones, generando direcciones de drenaje locales (DDL, por sus siglas en castellano) para el delineamiento de los canales de drenaje (Figura

¹ Disponible en <https://geobases.es.gov.br/novas-imagens-map-es-2012-2015-sem-ecw>

² Disponible en <https://geobases.es.gov.br/downloads>

3). En la segunda etapa, aplica las DDL y la red de drenaje para generar un mapa de drenaje más cercano a la altura sobre el drenaje, utilizando un valor de acumulación de flujo (umbral) de 5000 (Nobre et al., 2011).

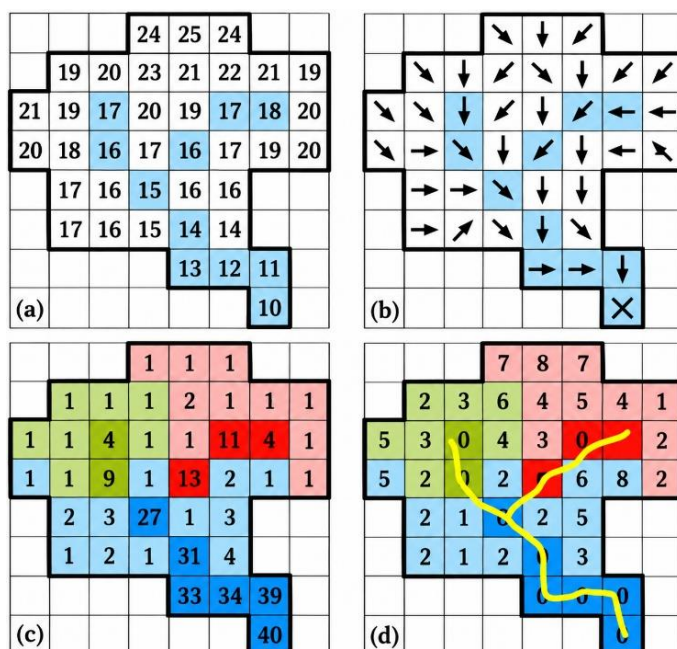


Figura 3: Representación de algunas etapas del HAND para la modelización del riesgo de inundación.

Fuente: Nobre et al. (2016).

El proceso del Modelo HAND comprende brevemente los siguientes pasos: (a) MDE corregido: El modelo comienza corrigiendo el Modelo Digital de Elevación (MDE), ajustándolo para que refleje con mayor precisión el terreno natural; (b) Dirección del flujo: El software determina la dirección del flujo del agua, para identificar la trayectoria que podrían seguir las crecidas; (c) Flujo de acumulación: Calcula cuánta agua puede acumular cada parte del terreno, un factor clave en la previsión de inundaciones; (d) Ráster HAND: Por último, se calcula el HAND, que es la elevación de un punto en relación con el desagüe más cercano, proporcionando una representación visual de las zonas de riesgo.

La versión Contorno HAND (HAND Contour), según Nobre et al. (2016), es una aplicación de las propiedades físicas del terreno para la previsión de la probable extensión del área de inundación. El HAND Contour utiliza líneas suavizadas mediante interpolación *spline* que "conectan puntos de igual altura_{HAND} (distancia vertical relativa al canal de drenaje más cercano a través de los respectivos caminos de flujo) al usar un modelo HAND" (Nobre et al., 2016, p. 322).

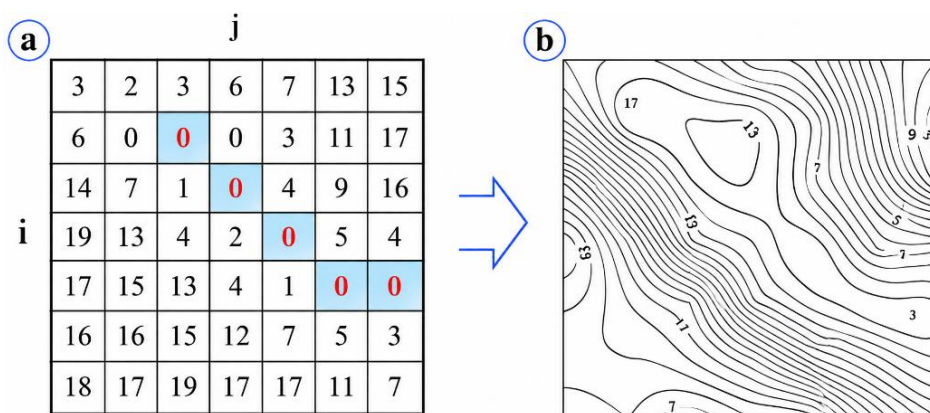


Figura 4: Procedimiento para la generación de isolíneas de flujos a partir del HAND Contour en ráster.

Fuente: Nobre et al. (2016).

El ráster del modelo de altura sobre el drenaje más cercano (HAND) (a) es interpolado (modelo HAND), y se generan líneas vectoriales de igual altura HAND (contornos HAND), produciendo un mapa de contornos HAND (b).

De esta forma, según los autores, el contorno HAND requiere fundamentalmente de la normalización topográfica, como un intermediario, para prever la extensión de la inundación relacionada con la altura sobre el drenaje más cercano, es decir, la altura en relación con el canal más cercano (Figura 4).

Clasificación de los riesgos a la inundación

A partir del modelo HAND Contour, se obtuvo un mapa de previsión jerarquizado, señalando las áreas y los grados de riesgo de inundación. Para la clasificación del grado de riesgo de las áreas inundadas, se realizó una jerarquización de los riesgos, considerando la relación entre la altura relativa del terreno respecto de la red de drenaje más próxima y la potencial susceptibilidad a la inundación, así como el mapeo de inundaciones observado en años anteriores (Tabla 1).

Tabla 1: Grados de riesgo de inundación en la cuenca hidrográfica del río Duas Bocas (ES).

Grado de riesgo	Altura en relación al río (m)
1 (Riesgo muy alto)	0 - 2
2 (Riesgo alto)	2 - 4
3 (Riesgo moderado)	4 - 6
4 (Riesgo bajo)	6 - 8
5 (Riesgo muy bajo)	8 - 10

Fuente: Elaboración propia.

En posesión de las áreas y el grado de riesgo de inundación, se obtuvieron las áreas en términos porcentuales de cada una de estas clases, su unidad geomorfológica, el uso y cobertura de la tierra dominante, así como el total de personas y viviendas en riesgo. Se destaca también que todas las operaciones de geoprocetamiento necesarias para el desarrollo de este trabajo, incluyendo la generación de los mapas de calor mediante estimación de densidad por *kernel*, fueron procesadas en el sistema de información geográfica de código abierto QGIS.

Validación de áreas susceptibles a inundación.

Para la validación de la modelización de las áreas susceptibles a inundación, se tuvo en cuenta la inundación ocurrida en diciembre de 2013, denominado por Marchioro y Coutinho (2021) como un evento extremo.

A partir de las áreas mapeadas y el uso de imágenes satelitales en la CHRDB se llevó a cabo la validación del evento acontecido en el año 2013 con la simulación realizada por HAND.

RESULTADOS

En la cuenca hidrográfica del río Duas Bocas, el área de inundación abarca 22,76 km², lo que equivale al 27,47% de toda la cuenca (Figura 5). Sin embargo, al analizar los grados de riesgo de inundación, se observa que los grados de riesgo muy alto y alto ocupan la mayor superficie, con un 12,12 km² (44,12%) y un 5,84 km² (21,26%) del área inundable, respectivamente (Figura 6).

La zona con mayor área de riesgo se concentra en la confluencia del río Duas Bocas con el río Santa María de la Vitória. Esta área ha sido clasificada por Gatto et al. (1983) como una Llanura Fluvio-Lagunar, caracterizada por un relieve con una pendiente muy suave y un nivel freático muy alto (Figuras 2, 5 y 7). Sin embargo, también hay algunas pequeñas planicies en el curso medio y alto de la cuenca, donde se observan algunas áreas inundables, pero son muy estrechas, con el control estructural muy fuerte.

Riesgo de inundación en la cuenca hidrográfica del río Duas Bocas (ES)

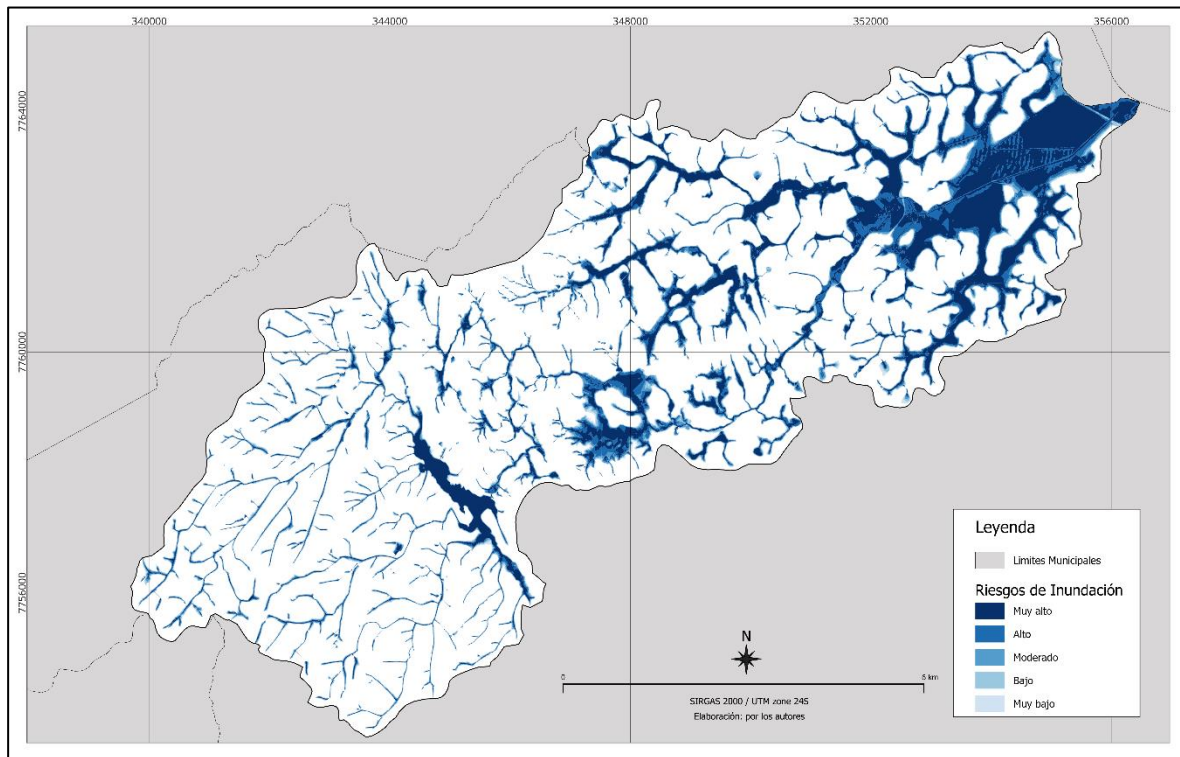
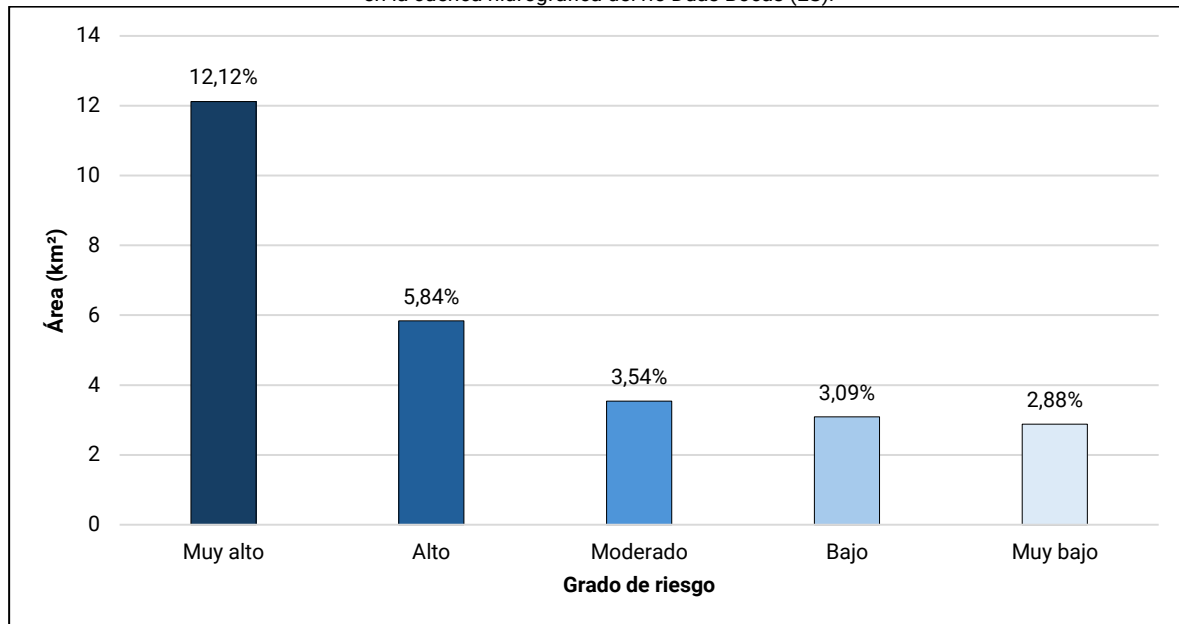


Figura 5: Distribución geoespacial del área de inundación en la cuenca del río Duas Bocas (ES)
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6: Distribución del área según los grados de riesgo de inundación en la cuenca hidrográfica del río Duas Bocas (ES).



Fuente: Elaboración propia.



Figura 7: Ilustraciones de la inundación en la llanura fluvio-lagunar en el grado de riesgo muy alto de la CHRDB (ES/Brasil).
Fuente: Archivo de los autores.

Cuando analizamos proporcionalmente las clases de uso y cobertura del suelo que son inundables, se puede verificar que las principales clases afectadas por la inundación son los pastizales, con 9,11 km² (40,02%), el Bosque Nativo (Mata Atlántica) con 5,48 km² (20,1%); y los humedales con 2,54 km² (11,18% del total del área inundable) (Figura 8).

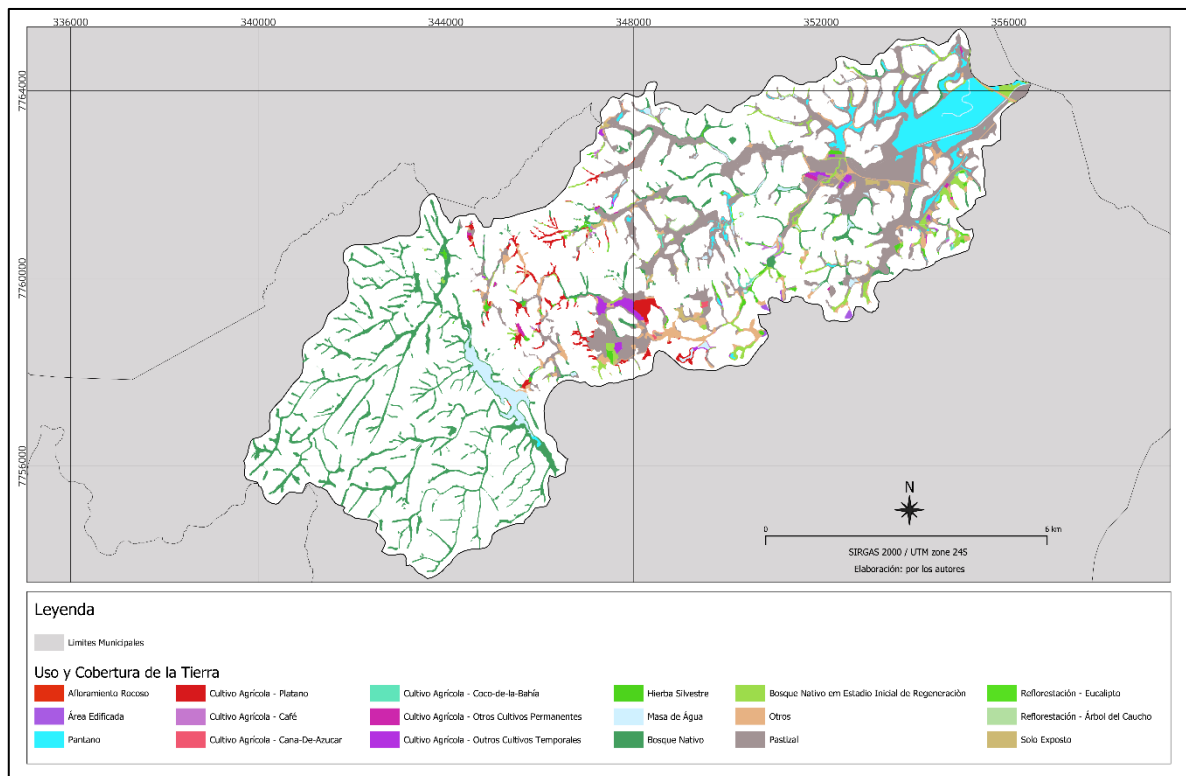


Figura 8: Uso y cobertura de la tierra en los sitios inundables de la CHRDB (ES/Brasil).
Fuente: Elaboración propia.

Los domicilios y los habitantes en riesgo

Según los datos del Censo de 2022 del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE), la CHRDB cuenta con un total de 2.779 domicilios y 5.110 habitantes, de ellos 1.425 domicilios y 2.618 habitantes están ubicados en áreas con algún grado de riesgo de inundación. De esto total, el 28,23% se encuentra en un grado de riesgo bajo y el 35,45% en un grado de riesgo muy bajo, mientras que solo un 4,55% se localiza en una zona de riesgo muy alto y un 11,73% en riesgo alto (Figura 9).

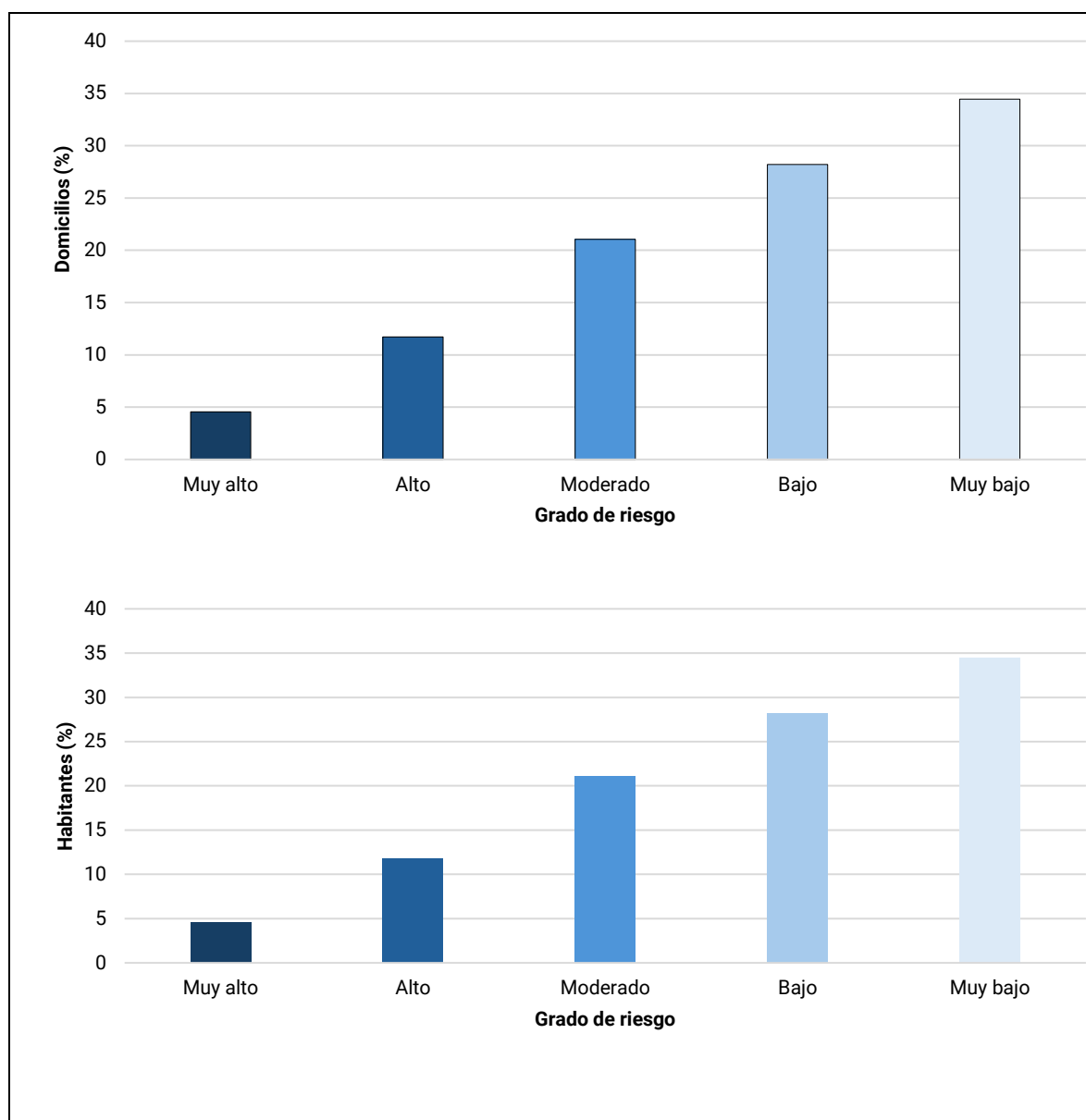
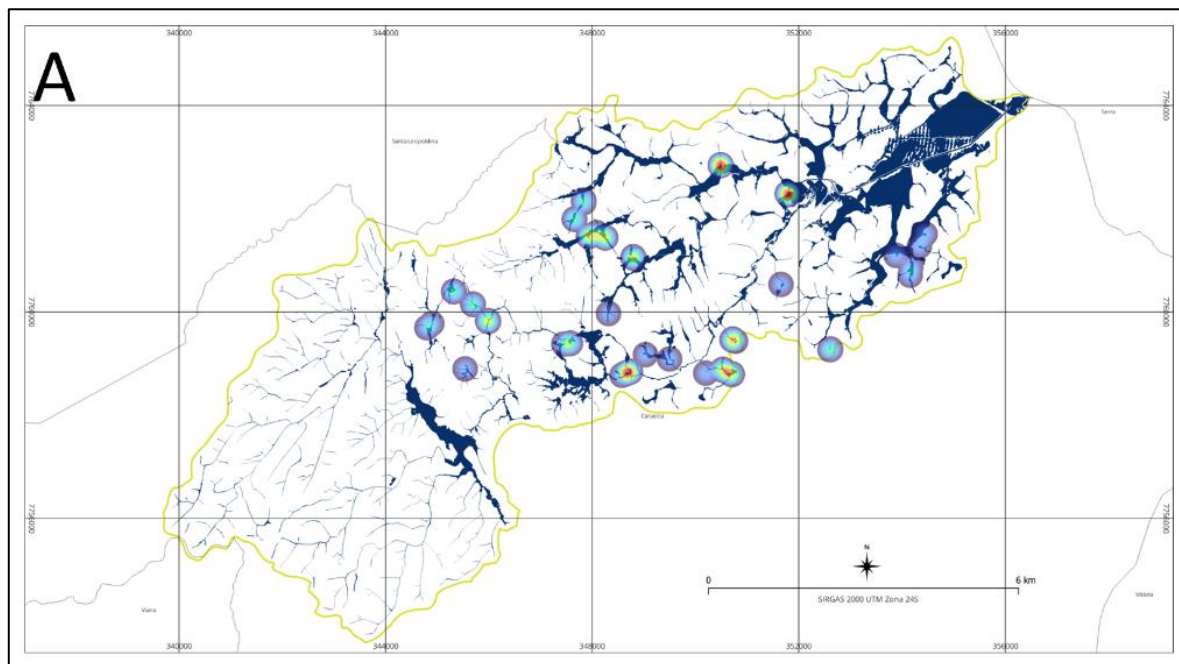
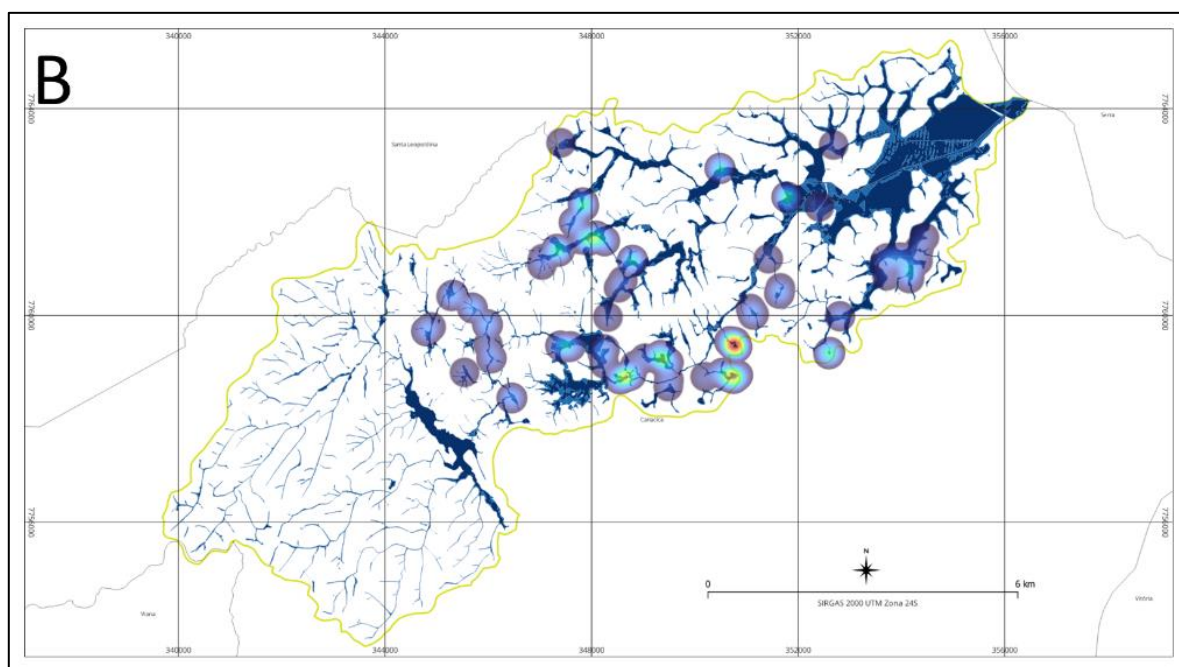


Figura 9: Porcentaje de domicilios y habitantes en riesgo en la CHRDB.

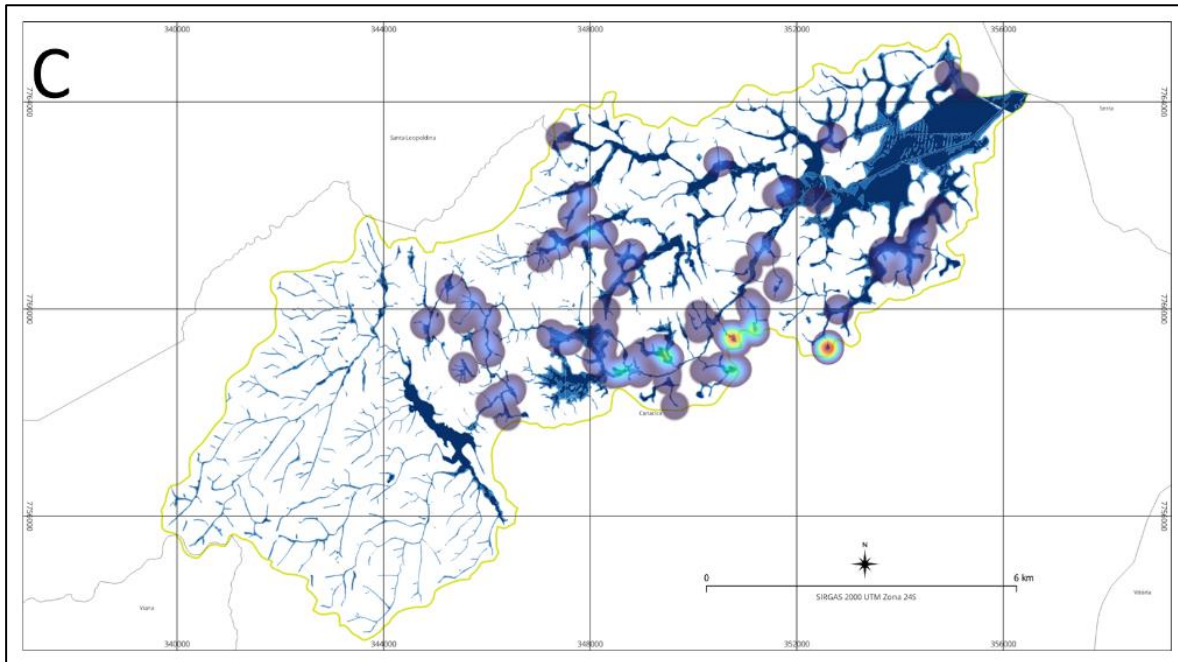
En la Figura 10 se presentan mapas de calor (*heatmap* o mapa de *kernel*), en el cual la simbología está definida por un gradiente de colores, que indica la intensidad y densidad de la concentración de domicilios en la CHRDB. Esta representación gráfica permite visualizar de manera clara e intuitiva las áreas con mayor y menor ocupación dentro de la cuenca, facilitando la identificación de zonas críticas en términos de riesgo de inundación.



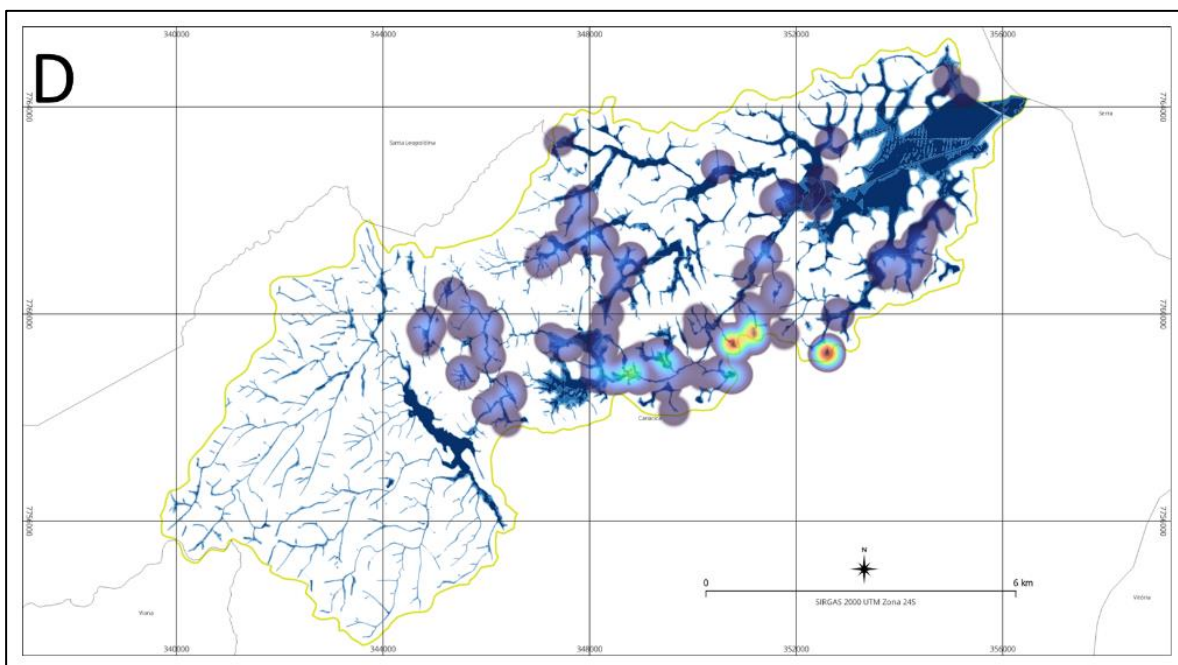
(A) Riesgo muy alto.



(B) Riesgo alto.



(C) Riesgo moderado.



(D) Riesgo bajo

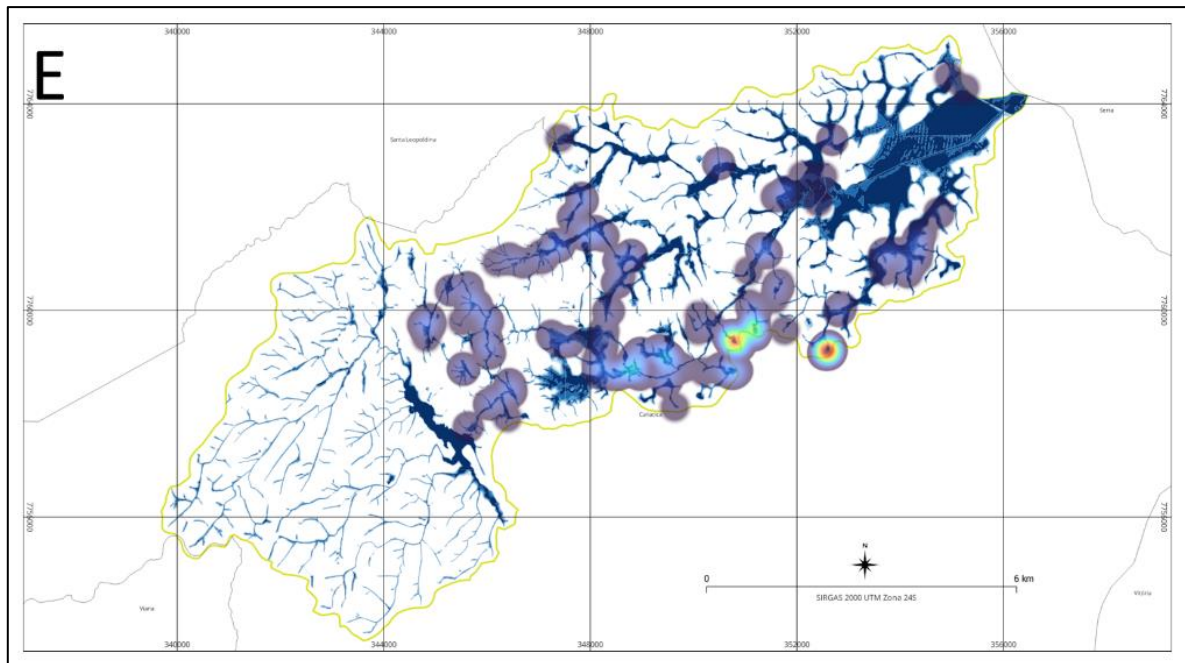


Figura 10: Mapas de calor con la distribución geoespacial de los domicilios en riesgo en la CHRDB. (A) Riesgo muy alto; (B) Riesgo alto; (C) Riesgo moderado, (D) Riesgo bajo; (E) Riesgo muy bajo. Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Características geoambientales y el riesgo

Al comparar las áreas de riesgo de inundación obtenidas por el HAND con las mapeadas por Marchioro y Coutinho (2021), se observa que para la planicie fluvio-lagunar el modelo resultó ser preciso, con una amplia inundación, como ocurrió en el evento extremo de 2013. Sin embargo, no se puede afirmar lo mismo en relación con otros paisajes, ya que no fueron mapeados previamente.

Considerando el carácter preciso en relación con el evento extremo para la CHRDB, Momo et al. (2016) destaca que, para inundaciones de pequeña magnitud, el modelo HAND tiende a sobrestimar el área susceptible a la inundación. Sin embargo, a medida que la cota de inundación aumenta, el rendimiento del modelo HAND mejora, lo que lo convierte en una información relevante para la toma de decisiones en cuanto al riesgo.

Al analizar las áreas que deben ser prioritarias para la reducción de riesgos de inundación, se recomienda considerar las de grado de riesgo muy alto y alto, que presentaron las mayores áreas porcentuales, concentrándose en su mayoría en la llanura fluvio-lacustre, con valles abiertos y colmatados con sedimentos cuaternarios, próximos al desagüe hacia el río Santa María da Vitória (ES). Las áreas de mayor riesgo en las planicies se deben a la distancia entre la celda y el río, ya que, cuanto menor es la variación altimétrica entre una celda y el canal y cuanto más próxima está al canal, mayor es el riesgo de inundación modelado por HAND (Cuartas et al., 2012; Goerl et al., 2017; Nobre et al., 2011; 2016).

Sin embargo, en la porción superior de la CHRDB, ocurren llanuras estrechas asociadas al control estructural y litológico, con la presencia de bosque nativo (Mata Atlântica), donde la inundación ocurre, pero en pequeñas porciones territoriales, corroborando su función geohidroecológica, ya que están libres de la acción humana, dado que se encuentran en los límites de la ReBio (Marchioro et al., 2023).

Milanesi et al. (2017) señala que es posible observar en algunas regiones de las cumbres una susceptibilidad muy alta a inundaciones, ya que el método de identificación de las áreas susceptibles a inundación no necesariamente se asocia a las regiones de menores altitudes, sino a los lugares bajos donde la acumulación de agua puede ocurrir de acuerdo con la topografía del lugar.

Según Marchioro y Coutinho (2021), la condición topográfica de la llanura fluvio-lagunar de la CHRDB favorece las inundaciones, con un gradiente altimétrico medio o bajo, presentando valores aproximados de hasta 1,67 m. Este bajo desnivel altimétrico en el paisaje cercano al desagüe de la CHRDB contribuye a promover un bajo gradiente hidráulico, dificultando el escurrimiento de las aguas superficiales y subsuperficiales, convirtiéndose en un paisaje con un nivel freático elevado y, la mayor parte del tiempo, saturado por acumulación de agua (Beven, 2001; Beven & Kirkby, 1979; Dunne & Black, 1970; Dunne & Leopold, 1978).

Asociado a este hecho, otro aspecto que corrobora estos grados de riesgo muy alto y alto en esta porción de la cuenca está relacionado con el efecto de embalsamiento promovido por el río Santa María de la Victoria, ya que, durante los períodos de lluvias por encima de la media, se produce un aumento del caudal de este último río, impidiendo el desagüe de las aguas del río Duas Bocas, hecho que fue verificado por Marchioro y Coutinho (2021).

Ordenamiento territorial de la CHRDB

En cuanto a la planificación y zonificación ambiental, los grados de riesgo de inundación mayores en la CHRDB son el muy alto y el alto, que deben recibir atención prioritaria en la elaboración e implementación de medidas preventivas y adaptativas, con el objetivo de minimizar los impactos de esas inundaciones. En este contexto, se recomienda que, para estas áreas de la CHRDB, se implementen actividades socioeconómicas que puedan suspenderse durante los períodos de inundación, a fin de reducir los daños y garantizar la seguridad de las comunidades locales.

La recomendación presentada para la CHRDB también es propuesta por Queiroga et al. (2023) para la Cuenca Hidrográfica del Río Jaguaribe (CHRJ), en João Pessoa, Paraíba, Brasil; por Milanesi et al. (2017), quienes también verificaron que el 98% de los puntos utilizados para la validación de la inundación en Porto Alegre/RS estaban clasificados en las categorías de mayor riesgo; y por Goerl et al. (2017), quienes, al adoptar 5 m como límite de segmentación para las áreas de inundación, verificaron que el 78% de los puntos de campo estaban incluidos en el área de inundación, lo que requiere un ordenamiento territorial colaborativo.

Las medidas preventivas y adaptativas para la CHRDB deben, prioritariamente, tener en cuenta lo establecido por la Ley N° 12.651 de 25 de mayo de 2012, es decir, el Nuevo Código Forestal Brasileño, que establece premisas básicas para la preservación de las cabeceras de drenaje, donde se encuentran los manantiales, y el ancho mínimo de las Áreas de Preservación Permanente (APP) en las márgenes de los ríos (Brasil, Ley N° 12.651, 2012). Además, se debe considerar la pendiente del terreno y la dinámica natural de los ríos a lo largo de sus llanuras para la elaboración de medidas adaptativas y preventivas, con el objetivo de minimizar los riesgos socioeconómicos.

Tales medidas tienen considerables impactos en la cuenca de drenaje, como la minimización de la producción de sedimentos que afectan al río (Marchioro et al., 2023), el aumento de la infiltración de agua en el suelo y, en consecuencia, la recarga del sistema subterráneo (Garde, 2006; Guzha et al., 2018; Montgomery & Bolton, 2003; Montgomery & Buffington, 1997; Ocampo et al., 2006; Sinha & Latrubesse, 2020), que son elementos importantes para la recuperación y restauración geohidroecológica del tercio medio e inferior de la CHRDB, ya que su porción alta está protegida por la cobertura vegetal de la Mata Atlántica, debido a que se encuentra en la ReBio de Duas Bocas.

CONCLUSIONES

El uso del HAND para la identificación de los riesgos de inundación ha demostrado ser una herramienta importante para la gestión y el ordenamiento de diferentes cuencas hidrográficas, ya que es un modelo que no requiere parámetros físicos de suelos, geología, geomorfología y uso y cobertura de la tierra, es fácil de manejar y tiene una precisión aceptable. Para este fin, se recomienda el uso de un ráster con alta resolución espacial, adecuado a las características del paisaje de las cuencas.

Considerando los datos divulgados para el censo demográfico de 2022 la cuenca hidrográfica del río Duas Bocas tiene un número proporcionalmente bajo de habitantes y hogares en riesgo muy alto y alto. Sin embargo, el proceso de urbanización que se está ampliando en el interior de la cuenca evidencia la necesidad de elaborar un plan de ordenamiento y gestión territorial que sea colaborativo, adaptativo y preventivo, para minimizar el impacto de las inundaciones. Este proceso requiere, además, analizar los códigos e indicadores urbanísticos de las zonas de ordenamiento territorial del área de la cuenca.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) por la concesión de una beca de iniciación a la investigación científica. La colaboración con el Instituto Jones dos Santos Neves y la Red Iberoamericana de Observación Territorial. E.M. agradece al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Brasil (CNPq) y a la Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de Espírito Santo (FAPES) por la concesión de una beca de productividad en investigación estatal (N.º 304330/2024-8). Al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) por el apoyo financiero otorgado en el marco de la Convocatoria CNPq/MCTI N.º 44/2024 – Modalidad A – Grupos Emergentes.

Referencias

- Agência Nacional de Águas [ANA]. (2014). *Atlas de Vulnerabilidade a Inundações*. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.
- Amaral, R. D., & Gutjahr, M. R. (2015). *Desastres naturais* (3.ª ed.). Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico.
- Bastos, K. V., Barrios López, J. F., Marchioro, E., & Gonçalves, A. O. (2015). Ritmo pluviométrico da bacia do Rio Duas Bocas (ES). En *I Simpósio Internacional de Águas, Solos e Geotecnologias – SASGEO*. Uberaba, Minas Gerais, Brasil.
- Beven, K. J. (2001). *Rainfall - runoff modelling*. John Wiley & Sons.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bierman, P. R., & Montgomery, D. R. (2019). *Key Concepts in Geomorphology* (2.ª ed.). W. H. Freeman.
- Birkmann, J. (2013). Risk. En P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 856-862). Springer Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_296
- Brasil. (2012, 25 de mayo). *Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012*. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa y dá outras providências. Diário Oficial da União. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651compilado.htm. (Versión en español https://www.gov.br/mj/pt-br/aceso-a-informacao/atualizacao-internacional/legislacao-traduzida/lei-no-12-651-de-25-de-maio-de-2012-senasp_esp-docx.pdf)

- Brierley, G., Fryirs, K., & Jain, V. (2006). Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. *Area*, 38(2), 165-174. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x>
- Christofoletti, A. (1981). *Geomorfologia fluvial*. Edgard Blücher.
- Cuartas, L. A., Tomasella, J., Nobre, A. D., Nobre, C. A., Hodnett, M. G., Waterloo, M. J., De Oliveira, S. M., De Cássia Von Randow, R., Trancoso, R., & Ferreira, M. (2012). Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. *Journal Of Hydrology*, 462-463, 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.047>
- Cunha, A., Feitoza, H. N., Feitoza, L. R., De Oliveira, F. S., Lani, J. L., Cardoso, J. K. F., & Trindade, F. S. (2016). Atualização da legenda do mapa de reconhecimento de solos do Espírito Santo e implementação de interface no Geobases para uso dos dados em SIG. *Geografares*, 2(22), 32-65. <https://doi.org/10.47456/geo.v2i22.30205>
- Delazari-Barroso, A., Sant'Anna, C. L., & Senna, P. A. C. (2007). Phytoplankton from Duas Bocas Reservoir, Espírito Santo State, Brazil (except diatoms). *Hoehnea*, 34(2), 211-229. <https://doi.org/10.1590/s2236-89062007000200006>
- Disse, M., Johnson, T., Leandro, J., & Hartmann, T. (2020). Exploring the relation between flood risk management and flood resilience. *Water Security*, 9, 100059. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100059>
- Dunne, T., & Black, R. D. (1970). Partial Area Contributions to Storm Runoff in a Small New England Watershed. *Water Resources Research*, 6(5), 1296-1311. <https://doi.org/10.1029/wr006i005p01296>
- Dunne, T., & Leopold, L. B. (1978). *Water in Environmental Planning*. W.H.Freeman.
- Fortes, P. de T. F. de O., Bastos, A. C., Lana, C. E., Althoff, B. J., Espinoza, J. A. A., & Campos, R. S. D. (2014). *Carta geológica: folha Vitória - SF.24-V-B-I*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Garde, R. J. (2006). *River Morphology*. New Age.
- Gatto, L. C. S., Ramos, V. L. S., Nunes, B. T. A., Mamede, L., Góes, M. H. B., Mauro, C. A., Alvarenga, S. M., Franco, E. M. S., Quirico, A. F., & Neves, L. V. (1983). Geomorfologia. En *Projeto RADAMBRASIL. Folhas SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória* (Vol. 32, pp. 305-384). Ministério das Minas e Energia.
- Goerl, R. F., Michel, G. P., & Kobiyama, M. (2017). Mapeamento De Áreas Susceptíveis a Inundação Com O Modelo HAND E Análise Do Seu Desempenho Em Diferentes Resoluções Espaciais. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69(1), 61-69. <https://doi.org/10.14393/rbcv69n1-44032>
- Gutiérrez, J. C. (2014). Análisis y planificación de zonas inundables. Estudio de caso: Quebrada y Canal de Ramón, Santiago de Chile. *Geographicalia*, 66, 21-44. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2014661067
- Guzha, A., Rufino, M., Okoth, S., Jacobs, S., & Nóbrega, R. (2018). Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. *Journal Of Hydrology Regional Studies*, 15, 49-67. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.005>
- Instituto Jones dos Santos Neves [IJSN]. (2012). *Mapeamento Geomorfológico do Estado do Espírito Santo*. Secretaria de Economia e Planejamento do Estado do Espírito Santo. <https://ijsn.es.gov.br/publicacoes/nota-tecnica/nt-28-mapeamento-geomorfologico-do-estado-do-espirito-santo>

- Kiffer, J. D. N., Zappes, C. A., & Marchioro, E. (2020). Saber tradicional de pequenos agricultores na bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, estado do Espírito Santo: uma abordagem da etnoclimatologia. *Geografias*, 30, 155-175. <https://doi.org/10.7147/geo30.28022>
- Kindlmann, P., & Burel, F. (2008). Connectivity measures: a review. *Landscape Ecology*, 23, 879-890. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9245-4>
- Lemos, F. H., De Souza, A. G., Barroso, G. F., & Marchioro, E. (2023). Des)Conectividade hidrológica ao longo do perfil longitudinal do rio Duas Bocas (ES). *Caminhos de Geografia*, 24(94), 79-98. <https://doi.org/10.14393/rcg249465806>
- Marchioro, E., & Barroso, G. F. (1996). Avaliação de sólidos transportados, parâmetro da morfometria e solos de seções fluviais do córrego Naiá-assú (Rebio de Duas Bocas - ES). *Caderno de Pesquisa (PPGE/UFES)*, 1(1), 185-195.
- Marchioro, E., & Coutinho, F. N. (2021). Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas (ES): um evento extremo em 2013. *Geografia (Londrina)*, 30(1), 477-497. <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2021v30n1p477>
- Marchioro, E., & Ollero, A. (2023). Evaluación hidrogeomorfológica en la cuenca hidrográfica del río Duas Bocas: Un abordaje histórico en los siglos XX y XXI. *GEOUSP Espaço E Tempo (Online)*, 27(3), 204803. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2023.204803>
- Marchioro, E., Silva, F. B., Nogueira, G. S., Lobo, Í. A., De Souza, A. G., Barreto, G. A. R., Effgen, J. F., Souza, J. o. P., & Buarque, D. C. (2023). Sediment connectivity in a hot and humidity tropical watershed: Contribution to environmental planning and management. *Journal Of South American Earth Sciences*, 132, 104657. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104657>
- Marchioro, E., Silva, G. M., & Correa, W. de S. C. (2016). A zona de convergência do Atlântico Sul e a precipitação pluvial do município de Vila Velha (ES): repercussões sobre as inundações. *Revista Do Departamento de Geografia*, 31, 101-117. <https://doi.org/10.11606/rdg.v31i0.108447>
- Mattiuzzi, H. V., & Marchioro, E. (2012). O comportamento dos ventos em Vitória (ES): A gestão e interpretação dos dados climaticológicos. *Revista Geonorte*, 3(5), 983-993. <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2160>
- Milanesi, J., De Quadros, E. L. L., & Lahm, R. A. (2017). Utilização do modelo HAND no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação - Porto Alegre/RS. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69(4), 675-686. <https://doi.org/10.14393/rbcv69n4-44327>
- Momo, M., Pinheiro, A., Severo, D., Cuartas, L., & Nobre, A. (2016). Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(1), 200-208. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p200-208>
- Montgomery, D. R., & Bolton, S. M. (2003). Hydrogeomorphic Variability and River Restoration. En R. C. Wissmar & P. A. Bisson (Eds.), *Strategies for Restoring River Ecosystems: Sources of Variability and Uncertainty in Natural and Managed Systems* (pp. 39-50). American Fisheries Society.
- Montgomery, D. R., & Buffington, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *GSA Bulletin*, 109(5), 596-611. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109%3C0596:CRMIMD%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109%3C0596:CRMIMD%3E2.3.CO;2)
- Nobre, A., Cuartas, L., Hodnett, M., Rennó, C., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., & Saleska, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal Of Hydrology*, 404(1-2), 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>

- Nobre, A., Cuartas, L., Momo, M. R., Severo, D. L., Pinheiro, A., & Nobre, C. A. (2016). HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes*, 30(2), 320-333. <https://doi.org/10.1002/hyp.10581>
- Ocampo, C. J., Sivapalan, M., & Oldham, C. (2006). Hydrological connectivity of upland-riparian zones in agricultural catchments: Implications for runoff generation and nitrate transport. *Journal Of Hydrology*, 331(3-4), 643-658. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.010>
- Parkinson, J., Milograna, J., Campos, L. C., & Campos, R. (2003, 7 maio). Drenagem urbana sustentável no Brasil. En *Relatório do Workshop em Goiânia-GO*.
- Queiroga, A. A., Oliveira, R. G. L., Filgueira, H. J. A., & Cunico, C. (2023). Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação aplicando diferentes modelos digitais de elevação no modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND). *Revista Do Departamento de Geografia*, 43, e191008. <https://doi.org/10.11606/eissn.2236-2878.rdg.2023.191008>
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing Of Environment*, 112(9), 3469-3481. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>
- Saharia, M., Kirstetter, P., Vergara, H., Gourley, J. J., & Hong, Y. (2017). Characterization of floods in the United States. *Journal Of Hydrology*, 548, 524-535. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.010>
- Santos, J. R. U., & Marchioro, E. (2018). Fragilidade emergente da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, Espírito Santo. *Revista Geografias*, 14(2), 8-30. <https://doi.org/10.35699/2237-549x.2018.19364>
- Sinha, R., & Latrubesse, E. M. (2020). Geomorphology of fluvial systems: Focus on tropical rivers. *Geomorphology*, 363, 107223. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107223>
- United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs [OCHA]. (2020). *Natural Disasters in Latin America and the Caribbean, 2000-2019*. United Nations.