

Artículo original

Evaluación de impacto en áreas de conservación: retos y una herramienta para aplicar análisis contrafactuales

Impact evaluation in area-based conservation: challenges and an app for conducting counterfactuals in Colombia

German Forero-Medina^{1,*}, Felber J. Arroyave¹, Victor J. Rincón-Parra²,
Silvia J. Álvarez¹, Pablo J. Negret³

¹ Wildlife Conservation Society, Cali, Colombia,

² Département de biologie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada

³ Wyss Academy for Nature, Bern, Switzerland; Centre for Development and Environment, University of Bern, Switzerland; Institute of Geography, University of Bern, Switzerland

Resumen

La evaluación rigurosa del impacto de las estrategias de conservación es clave para identificar qué acciones son más efectivas, promover el aprendizaje adaptativo y orientar una asignación más eficiente de los recursos. No obstante, en la práctica, este tipo de evaluaciones han sido escasas. En este artículo discutimos estos vacíos de conocimiento y presentamos *CONTRAFACTUAL*, una herramienta desarrollada para facilitar la evaluación del impacto de estrategias de conservación basadas en área, como áreas protegidas y OMECs, sobre la reducción de la deforestación. Esta herramienta está basada en análisis contrafactuales usando la metodología de emparejamiento estadístico mediante puntajes de propensión. Permite así comparar unidades espaciales tratadas (e.g., áreas protegidas) con unidades de control con características similares. Usando *CONTRAFACTUAL* analizamos la pérdida de bosque en 23 parques nacionales naturales de Colombia en el año 2024. Encontramos una variabilidad en la efectividad de las áreas protegidas estudiadas para contener la pérdida de bosque (efecto entre -54% y 100%), no obstante, la mayoría de los PNN estudiados presentaron efectos positivos ($\bar{X}=73,6\%$; $SD=28,9$; $n=16$). Los resultados evidencian la importancia de contextualizar las métricas de pérdida de bosque, y demuestran que los análisis contrafactuales ofrecen un enfoque robusto para comprender y monitorear el impacto de las intervenciones de conservación basadas en área. Con esta propuesta se busca contribuir a cerrar la brecha entre la teoría y la práctica en la evaluación de impacto, proporcionando una herramienta útil para gestores, autoridades ambientales, formuladores de políticas y la sociedad civil, interesados en evaluar y mejorar el desempeño de las áreas de conservación en el país.

Palabras clave: Áreas protegidas, Colombia, contrafactual, deforestación, efectividad, Parques Nacionales.

Abstract

Rigorous impact evaluation of conservation strategies is essential for making informed conservation decisions, improving intervention effectiveness, and allocating resources efficiently. However, in practice, this type of evaluation remains limited, particularly regarding the use of counterfactual methods that enable causal inference. In this article, we discuss current implementation gaps and present *CONTRAFACTUAL*, a practical and accessible tool developed to support the evaluation of area-based conservation strategies, such as protected areas and OECMs, in reducing deforestation in Colombia. This tool is based on a counterfactual analysis approach that uses statistical matching through propensity scores to compare treated spatial units with equivalent control units, correcting for biases resulting from the non-random assignment of interventions. We applied the tool to analyze 23 national parks in Colombia in the year 2024, revealing wide variability in the effectiveness of protected areas in preventing forest loss (effect range: -54% to 100%), with mainly positive effects

Citación: Forero-Medina G, et al. Evaluación de impacto en áreas de conservación: retos y una herramienta para aplicar análisis contrafactuales. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):760-776, julio-septiembre de 2026. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.4027>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

German Forero-Medina;
gforero@wcs.org

Recibido: 19 de enero de 2026

Aceptado: 2 de junio de 2026

Publicado en línea: 8 de julio de 2026



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

observed ($\bar{X}=73,6\%$; $SD=28,9$; $n=16$). The results highlight the importance of contextualizing metrics of forest loss and gain and demonstrate that counterfactual analyses offer a robust approach to understanding and monitoring the true impact of area-based conservation interventions. This initiative seeks to bridge the gap between conservation science and practice, providing a useful resource for land managers, environmental authorities, and policymakers aiming to evaluate and enhance the performance of conservation areas in Colombia.

Key words: Protected areas, Colombia, counterfactuals, deforestation, impact evaluation.

Introducción

Un paso esencial en la práctica de la conservación es la evaluación del impacto de las iniciativas o programas implementados (Baylis *et al.*, 2016; Langhammer *et al.*, 2024). Los tomadores de decisiones requieren saber cómo determinadas políticas, estrategias o intervenciones inciden sobre el estado de los ecosistemas y su biodiversidad (Andam *et al.*, 2008). Además, comprender por qué ciertas acciones tienen menor o mayor éxito es fundamental para diseñar iniciativas cada vez más efectivas e incrementar el retorno de las inversiones en proyectos de conservación (Baylis *et al.*, 2016). Sin embargo, la evaluación de los programas de conservación suele limitarse al monitoreo de indicadores de gestión (ej., ejecución de actividades, narrativas de casos de estudio) o de cambio de estado, en lugar de indicadores de impacto mediante análisis empíricos que evalúen los efectos de las intervenciones en comparación con escenarios sin intervención alguna (Ferraro, 2009; Ferraro y Pattanayak, 2006). Por ello, hay un llamado creciente a incorporar métodos rigurosos que permitan la evaluación sistemática del impacto de las acciones para la conservación (Ferraro y Pattanayak, 2006).

El objetivo de la evaluación de impacto es determinar si los cambios observados (resultados) pueden atribuirse a un programa, política o intervención, en lugar de a factores externos (Ferraro, 2009). Dicha evaluación se logra estimando el efecto causal de una intervención específica (tratamiento), idealmente mediante un análisis contrafactual; es decir, estimando el resultado que habría ocurrido en ausencia de dicha intervención (Ferraro y Pattanayak, 2006; Ferraro y Pressey, 2015). Esta evaluación de relaciones de causalidad se puede lograr por medio de diseños experimentales aleatorizados o, cuando las intervenciones no pueden ser asignadas aleatoriamente, por medio de métodos estadísticos adecuados (Ferraro & Pattanayak, 2006).

En conservación, realizar las intervenciones bajo un diseño experimental con el uso de grupos control, asignación aleatoria de las unidades experimentales y replicación, puede ser un reto. Existen limitaciones logísticas, financieras y éticas. Las áreas protegidas, por ejemplo, son diseñadas y ubicadas espacialmente de acuerdo con múltiples criterios biológicos y de oportunidad, mas no de forma aleatoria (Joppa y Pfaff, 2009). Sin embargo, existen métodos estadísticos que permiten corregir y controlar los efectos de la no aleatorización y moderar los factores de confusión. Estos últimos son variables externas que afectan tanto a la variable independiente como a la dependiente, distorsionando la relación real entre ellas y pudiendo llevar a conclusiones erróneas sobre causalidad (VanderWeele, 2019).

Los análisis contrafactuales, como herramienta para evaluar el impacto o la relación causal entre una intervención (tratamiento) y el resultado observado, se utilizan comúnmente en disciplinas como la salud pública y la economía (ej. evaluación de la reducción de la pobreza), pero su adopción en la práctica de la conservación ha sido más lenta (Baylis *et al.*, 2016; Ferraro, 2009). No obstante, se han aplicado con éxito diseños cuasiexperimentales en la evaluación de la efectividad de las áreas protegidas (APs) para prevenir la deforestación (Andam *et al.*, 2008; Joppa *et al.*, 2008; Joppa y Pfaff, 2011; Negret *et al.*, 2020).

Las APs son una de las principales estrategias para conservar la biodiversidad, y en particular para contener la deforestación (Wolf *et al.*, 2021). Por lo tanto, es indispensable realizar evaluaciones para entender qué tan efectivas son evitando la pérdida de bosque. Para esto, no es suficiente evaluar la deforestación dentro de un área determinada a lo

largo del tiempo. Es necesario evaluar el escenario contrafactual y responder las siguientes preguntas: ¿cuánto bosque se habría perdido si no existiera el AP?, es decir, ¿cuál fue el efecto del AP en la reducción de la pérdida de bosque? (**Figura 1**). Sin embargo, estimar este efecto es difícil ya que la deforestación evitada no se puede medir de manera directa (**Andam et al., 2008**).

Algunos métodos para estimar la deforestación evitada se basan en la comparación de APs con áreas no protegidas, con escenarios tendenciales, o con una línea base de la región donde se encuentran (**Burivalova et al., 2019; Ribas et al., 2020**). No obstante, dado que las APs no están distribuidas aleatoriamente en el espacio y suelen ubicarse en zonas con características particulares, no pueden compararse con cualquier área no protegida. En cambio, deben ser comparadas con un área con características similares. En Colombia, las APs han sido ubicadas lejos de carreteras y en pendientes altas (**Forero-Medina y Joppa, 2010**). Estas condiciones están a su vez asociadas con una baja probabilidad de deforestación, ya que áreas planas y cerca de carreteras tienden a tener mayor riesgo de ser transformadas (**González-González et al., 2021**). De esta forma, los enfoques convencionales para evaluar el impacto de la conservación que no controlan adecuadamente las variables correlacionadas, tanto con la protección como con la deforestación, pueden llevar a sobre o subestimar la deforestación evitada (**Andam et al., 2008**).

Un método cada vez más usado en conservación para evaluar impacto y mejorar la inferencia causal a partir de datos no experimentales es el emparejamiento estadístico (“*statistical matching*”) (**Joppa y Pfaff, 2010; Schleicher et al., 2020**). Esta técnica identifica unidades de control que se asemejan a las unidades de tratamiento (APs u otras estrategias de conservación basadas en área) según una medida de similitud basada en características medibles predefinidas (covariables) (**Stuart, 2010**). Así, este método emula un diseño experimental al identificar grupos de tratamiento y control con características similares, permitiendo comparar “manzanas con manzanas” (**Rosenbaum y Rubin, 1983; Schleicher et al., 2020**). Por lo tanto, el emparejamiento estadístico puede ayudar a controlar sesgos de localización y factores de confusión. Aunque este método y otros similares ya han sido utilizados por diversos autores para evaluar el efecto de las APs en la reducción de la deforestación, siempre han sido usados desde una perspectiva académica (**Armenteras et al., 2009; Joppa y Pfaff, 2011; Joppa y Pfaff, 2010; Negret et al., 2020**).

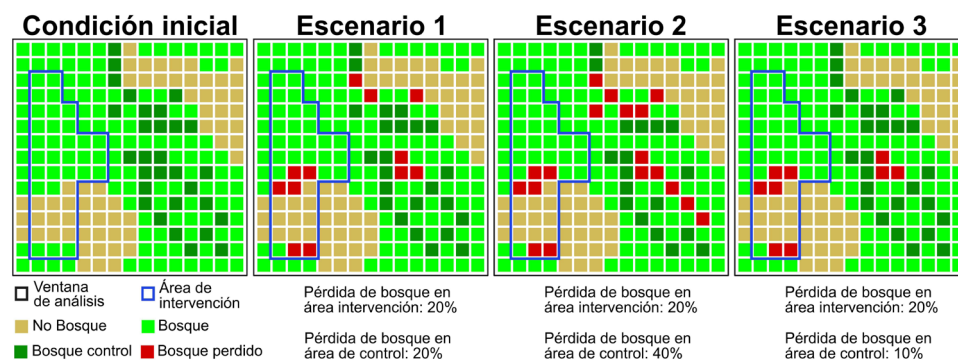


Figura 1. Esquema ilustrativo de un área de intervención o tratamiento (azul) en la ventana de análisis (negro), mostrando posibles escenarios de pérdida de bosque. En verde oscuro se señalan los píxeles de bosque seleccionados como control. Cada escenario muestra la pérdida de bosque (rojo) en el área de intervención y el área control, las cuales son comparadas para estimar el efecto del tratamiento (protección). Así, el tratamiento puede tener un efecto positivo (Escenario 2), negativo (Escenario 3) o ningún efecto (Escenario 1) en la reducción de la pérdida de bosque, independientemente del valor de pérdida observada en el área de intervención.

Sin embargo, los gestores de las APs y los tomadores de decisiones también requieren evaluar el efecto de sus áreas sobre la reducción de la deforestación. Esta evaluación es importante para entender cómo se está desempeñando un área particular, en un periodo determinado, considerando las acciones implementadas por el equipo y el contexto particular (**Figura 1**). También permite rediseñar programas existentes, redireccionar esfuerzos de control y vigilancia y, en general, mejorar la efectividad de las estrategias de manejo. No obstante, los tomadores de decisión pueden enfrentar desafíos para implementar este tipo de evaluaciones de impacto.

Los diseños cuasiexperimentales y los métodos como el emparejamiento estadístico, aunque intuitivos, no suelen utilizarse en los programas de evaluación ambiental convencionales ni están disponibles como funciones en paquetes de software comúnmente usados por gestores o tomadores de decisión. Para promover un mayor uso de enfoques contrafactuales y evaluaciones cuantitativas de impacto, es necesario proporcionar herramientas accesibles que permitan implementar estos métodos y contribuir así a cerrar la brecha entre la ciencia y la práctica de la conservación.

Con el fin de promover y facilitar evaluaciones de impacto rigurosas, con un enfoque contrafactual en Colombia, desarrollamos una herramienta llamada *CONTRAFACTUAL*. Esta herramienta permite al usuario, de manera sencilla e intuitiva, comparar unidades espaciales (píxeles) dentro del área de intervención (tratamiento) con unidades espaciales fuera de dicha área (control), seleccionadas con base en características similares (covariables), reduciendo así el sesgo causado por la localización no aleatoria de la intervención y permitiendo comparaciones válidas. La herramienta permite así evaluar el efecto de las estrategias de conservación basadas en área sobre la pérdida o ganancia de bosque.

CONTRAFACTUAL está dirigida principalmente a tomadores de decisión que deseen evaluar el impacto de un área protegida o un proyecto de conservación sobre la reducción de la deforestación o cambio neto en la extensión del bosque. También puede ser útil evaluar la reducción de la deforestación en programas de pagos por servicios ecosistémicos. En muchos casos, los gestores suelen enfocarse en medir la deforestación dentro del área del proyecto a lo largo del tiempo. Sin embargo, dicho enfoque no evalúa correctamente el escenario contrafactual, limitando la capacidad de inferir causalidad y entender el efecto real de la intervención (**Figura 1**). Esta herramienta permite superar esta limitación mediante la comparación explícita entre unidades espaciales tratadas y controles equivalentes. Con el fin de ilustrar el uso, tipo de resultados e interpretación de hallazgos derivados de la herramienta, analizamos el efecto de algunas áreas protegidas de Colombia sobre el cambio en la cobertura de bosque durante el año 2024.

Métodos

La herramienta *CONTRAFACTUAL* se basa en los métodos presentados por **Negret et al.** (2020) para evaluar la efectividad de las áreas protegidas en la reducción de la pérdida de bosque. La base teórica es el emparejamiento estadístico de unidades espaciales equivalentes utilizando puntajes de propensión (**Olmos y Govindasamy, 2015; Schleicher et al., 2020**) (ver paso de emparejamiento a continuación). *CONTRAFACTUAL* es un software libre desarrollado en el lenguaje R, que se ejecuta a través de una aplicación Shiny usando una interfaz intuitiva que no requiere conocimientos previos en programación. Una vez abierta la interfaz, el análisis inicia ingresando el polígono del área de intervención (área de implementación del proyecto o área protegida), siendo esta la única información exógena necesaria para la ejecución de la herramienta. Posteriormente, la herramienta solicitará al usuario seleccionar las covariables a usar para construir el modelo de emparejamiento, y con ello, realizar la cuantificación del efecto del área de estudio en el cambio de la cobertura de bosque. *CONTRAFACTUAL* utiliza el paquete MatchIt (**Ho et al., 2011**) en R (versión 4.2.0) para realizar el emparejamiento estadístico. La herramienta y el documento tutorial de uso, al igual que sus futuras actualizaciones, están disponibles para su descarga en el siguiente vínculo (<https://tinyurl.com/contrafactual>).

CONTRAFCTUAL es compatible con la versión 10 o superior de Windows, pero no requiere instalación, ni tener aplicaciones adicionales preinstaladas en el computador. Una vez descargado, el primer paso es descomprimir y abrir la aplicación Shiny usando el icono del ejecutable. A continuación, se describen algunas consideraciones necesarias previas al uso de la herramienta, seguidas de la serie de pasos necesarios para su ejecución (**Figura 2**).

Fundamentos de uso de la herramienta CONTRAFCTUAL

La evaluación de impacto requiere una teoría de cambio clara y un modelo de las vías causales que vinculan una intervención específica con el resultado de interés (**Ferraro y Hanauer, 2014; Neugarten et al., 2025**). Por lo tanto, un paso esencial previo a ejecutar la herramienta es comprender el contexto de la intervención y desarrollar dicha teoría de cambio. Los usuarios deben tener una respuesta clara a las siguientes preguntas: ¿cuál es la intervención (tratamiento)? (ej. las acciones de control y vigilancia realizadas en un AP), ¿cuál es la variable respuesta de interés? (ej., cambio en la proporción de bosque, tasa de ganancia de bosque), ¿cuál es el resultado esperado de cada intervención con respecto a las variables respuesta? (cadena de resultados), ¿qué otras intervenciones o tipos de uso del suelo ocurren en el mismo paisaje? ¿además de la intervención, qué variables podrían influir en la pérdida o ganancia de bosque en el área de intervención? Esta información permitirá identificar una pregunta de evaluación clara, y determinar si se puede responder utilizando *CONTRAFCTUAL*.

Paso 1: Definir área de intervención, ventana de análisis y periodo de evaluación

La única información que debe ingresar el usuario a la herramienta son los datos vectoriales espacialmente explícitos del área del proyecto, es decir, el área de intervención (tratamiento) (**Figura 2**, panel A). Esta corresponde al polígono que delimita la(s) zona(s) donde se llevaron a cabo las acciones con el propósito de afectar la variable respuesta. Por ejemplo, un área protegida que tiene como objetivo reducir la pérdida de bosque.

En segundo lugar, se define la ventana de análisis, que corresponde a un área sin tratamiento (por ejemplo, no protegida), que circunscribe el área de intervención y de donde se seleccionarán las unidades espaciales que conforman el control. Esta ventana es definida automáticamente por la herramienta, seleccionando los municipios que interceptan el polígono del área de intervención (**Figura 2**). Aunque la herramienta sugiere los municipios que interceptan el polígono, el usuario puede ampliar la ventana de análisis agregando municipios adyacentes. Es importante conocer qué otras figuras o unidades de protección o manejo existen en esta ventana, con el fin de tener claridad sobre aquellas que deben o no ser consideradas como área control (**Schleicher et al., 2020**). Una vez definida la ventana de análisis, la herramienta cargará automáticamente los datos correspondientes de los municipios seleccionados para las variables respuesta y las covariables necesarias para realizar los análisis posteriores.

La herramienta opera utilizando un formato ráster, en el cual los píxeles son las unidades espaciales para el análisis. Todas las variables corresponden a rasters y la variable respuesta, pérdida de bosque, se estima para cada una de las unidades (píxel) del área de intervención (tratamiento) y de control. El tamaño del píxel predeterminado es de 30x30 m, que corresponde a la resolución del ráster de las capas de cambio en la superficie cubierta por bosque natural desarrolladas por IDEAM, la entidad a cargo de estimar las tasas de deforestación oficiales en Colombia (**IDEAM, 2025**). Es importante asegurarse de que el polígono del área de intervención sea lo suficientemente grande para permitir réplicas espaciales, es decir, que contenga un número de píxeles que permita una estimación estadística robusta. Por ejemplo, un área de intervención de tres hectáreas contendrá aproximadamente 30 píxeles, mientras que una de 100 hectáreas tendría 1.100 píxeles. Esta última tendrá un menor margen de error y mayor significancia del resultado estadístico. Tres hectáreas podrían considerarse el tamaño mínimo para la evaluación del efecto de la intervención usando la herramienta.

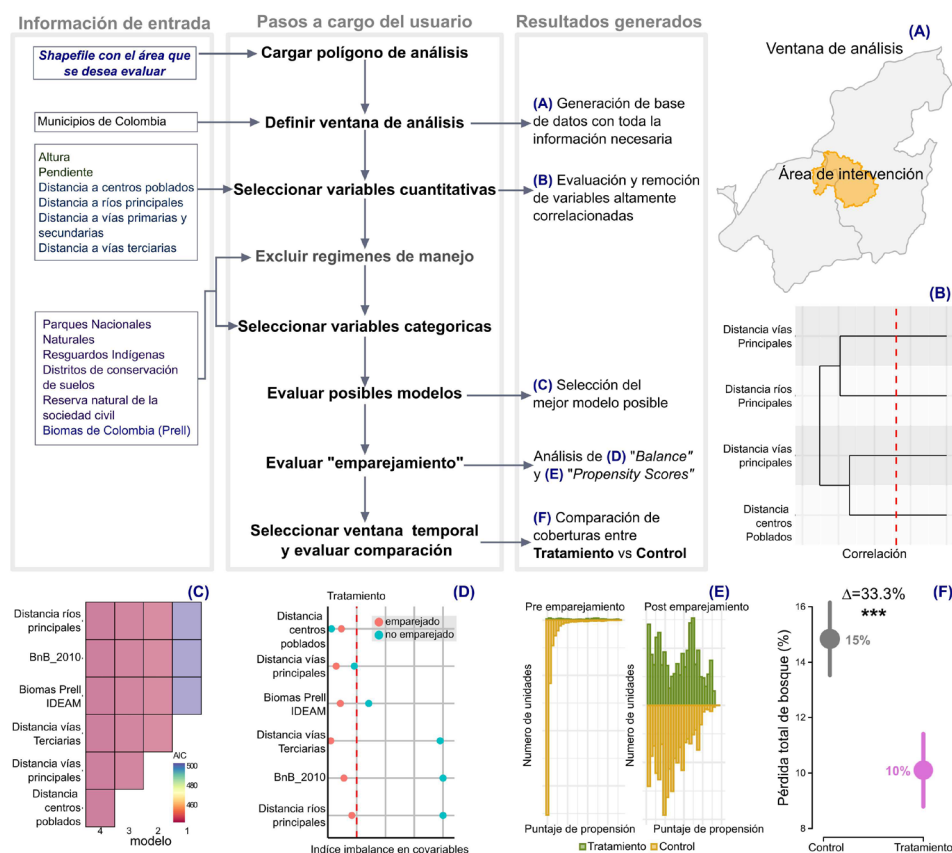


Figura 2. Flujo de trabajo de la herramienta *CONTRAFCTUAL*. El *shapefile* del área a evaluar es el único elemento que se debe proporcionar para el análisis. En "Resultados generados" se muestran versiones simplificadas de las gráficas generadas por la herramienta, incluyendo la selección del área de estudio (A), la correlación de las variables cuantitativas (B), la selección del mejor modelo (C), la evaluación del emparejamiento (D-E) y la comparación entre el control y el tratamiento (F).

Seguidamente, el usuario deberá definir el periodo de evaluación para el cual se realizará el análisis contrafactual. Dicho periodo corresponde al intervalo de tiempo en el que se quiere evaluar el efecto del tratamiento. De acuerdo con la disponibilidad de las capas de cambio en la superficie cubierta por bosque natural proporcionadas por el IDEAM, el usuario podrá seleccionar cualquier periodo de tiempo comprendido entre 2013 y 2024 (la herramienta será actualizada a medida que se haga disponible nueva información).

Considerando que el polígono de estudio o la ventana de análisis pueden ser muy grandes (ej. varios cientos de kilómetros cuadrados) y por tanto requerir alta capacidad de almacenamiento (memoria RAM) y tiempos de cómputo muy largos (días e incluso semanas), la herramienta permite al usuario agilizar el proceso mediante el uso de una muestra espacialmente explícita de píxeles. Dicha muestra corresponde a una selección de píxeles distanciados homogéneamente a 120 metros, que corresponde a cerca de un 6.25% del total de píxeles del polígono de estudio. La utilización de la muestra permite reducir el tiempo de cómputo en hasta un 99% sin afectar significativamente los resultados del análisis. A manera de ejemplo, en pruebas realizadas para el Parque Nacional Natural Los Katíos, se evidencia que el resultado obtenido con todo el conjunto de píxeles se encuentra dentro del rango de variación estimado usando solo las muestras (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362>). De esta manera, es posible afirmar que los resultados obtenidos mediante el uso de muestreo homogéneamente

espaciado son representativos de lo que se puede obtener al analizar todo el conjunto de píxeles. Sin embargo, es recomendable limitar el uso de las muestras para casos en los que las capacidades de cómputo sean insuficientes o en caso de que se quieran realizar evaluaciones parciales de forma rápida.

Paso 2: Selección de covariables

Las covariables serán utilizadas para identificar las características de los píxeles en el área de intervención (tratamiento) y basado en estas características identificar píxeles similares en la ventana de análisis (píxeles de control) (**Figura 2**). El modelo para el análisis de emparejamiento debe incluir aquellas covariables que pueden influir tanto en la asignación de una unidad espacial al tratamiento como en el resultado de dicho tratamiento sobre la variable respuesta (**Schleicher et al.**, 2020). Por ejemplo, la elevación puede influir en la ubicación de las áreas protegidas (algunas tienden a ubicarse en áreas altas y empinadas) y también puede afectar la probabilidad de deforestación (**Joppa y Pfaff**, 2009). Es útil elaborar una lista de esas variables, basada en el conocimiento de la región y la teoría de cambio descrita anteriormente, para decidir cuáles incluir en el modelo. Las covariables incluidas en *CONTRAFACTUAL* son tanto cuantitativas como categóricas (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362>) y se deben seleccionar en pasos independientes en la herramienta. La herramienta de forma automática incluye como una de las covariables la categoría en la capa de cambio del IDEAM correspondiente al año de evaluación, con el fin de emparejar píxeles que correspondían originalmente a bosque o a no bosque entre sí. Es decir, que no se emparejen píxeles de bosque con píxeles sin bosque debido a las otras variables del modelo. Esto busca garantizar también que haya cantidades similares de bosque en el conjunto de píxeles tratamiento y control. Esto debido a que la magnitud de la pérdida de bosque está relacionada con la cantidad de bosque disponible.

Como un paso automático incluido en la herramienta, de las variables seleccionadas se excluyen aquellas altamente correlacionadas, que se identifican mediante pruebas de multicolinealidad (**Figura 2**, panel B). Para ello, *CONTRAFACTUAL* usa coeficientes de inflación y correlación entre las variables y valores de corte, que pueden ser parcialmente ajustados por el usuario.

Las áreas dentro de la ventana de análisis que reflejan otros tipos de estrategias de manejo o gobernanza (APs, territorios indígenas, etc.) pueden ser excluidas, dependiendo del tratamiento que se quiera evaluar. Por ejemplo, al querer evaluar la efectividad de una Reserva Natural de la Sociedad Civil en la reducción de la deforestación, es ideal que en el área control no se encuentren otras Reservas o Parques Nacionales Naturales, pues se podría subestimar el efecto de la reserva objeto del análisis.

Paso 3: Selección del mejor modelo

El modelo de regresión logística se utiliza para establecer la relación entre las covariables y la asignación al tratamiento estudiado (en este caso, la protección), es decir, para distinguir los píxeles tratados de los no tratados. Posteriormente, este modelo se usará para calcular los puntajes de propensión, que se usarán para balancear los grupos y reducir sesgos. La herramienta evalúa diferentes posibles modelos de regresión logística mediante el método ‘stepwise’ (**Johnsson**, 1992), usando diferentes combinaciones de las variables cuantitativas como variables predictivas y la asignación al tratamiento (binaria) como la variable respuesta. La herramienta selecciona el mejor modelo, dentro de todos los evaluados, usando el Criterio de Información de Akaike (AIC) (**Figura 2**, panel C). Es importante señalar que este paso y los subsecuentes se realizan para cada año incluido en el periodo de evaluación.

Paso 4: Cálculo y evaluación del emparejamiento estadístico

CONTRAFACTUAL ejecuta el proceso de emparejamiento estadístico utilizando el paquete MatchIt (**Ho et al.**, 2011), que estima los puntajes de propensión usando el mejor modelo de regresión logística desarrollado en el paso anterior, para cada año de evaluación. La

estimación de puntajes de propensión es una técnica estadística útil para evaluar los efectos de una intervención cuando se utilizan datos observacionales, o en cualquier caso en el que no sea posible asignar aleatoriamente las unidades a las condiciones de tratamiento por razones operativas (Olmos y Govindasamy, 2015; Rosenbaum y Rubin, 1983). Estos puntajes se definen como la probabilidad de que una unidad reciba el tratamiento dadas sus características observadas (covariables) (Olmos y Govindasamy, 2015). En los datos observacionales, dicha probabilidad es desconocida, pero se estima mediante el modelo de regresión logística que predice la asignación al tratamiento a partir de covariables (Olmos y Govindasamy, 2015). De esta forma, el proceso de emparejamiento identifica los píxeles dentro de la ventana de análisis (píxeles control) que, de acuerdo con su combinación de covariables (puntaje de propensión), presentan las características más similares a los píxeles del tratamiento. Así, para cada píxel del tratamiento, el emparejamiento busca el píxel control cuyo valor de propensión sea el más cercano posible (Olmos y Govindasamy, 2015). Aunque existen diferentes tipos de emparejamiento utilizando puntajes de propensión, *CONTRAFACTUAL* usa el método de selección uno a uno sin reposición, es decir, para cada píxel del tratamiento se selecciona un píxel control que no podrá ser usado nuevamente en el análisis.

Una vez realizado el emparejamiento, la herramienta permite evaluar su desempeño de dos formas, que comparan qué tan parecidos son los píxeles del tratamiento con los píxeles control antes y después del emparejamiento. Este paso no debe ser confundido con la cuantificación del efecto del tratamiento, que será explicado en el paso 5. La primera forma de evaluación del proceso de emparejamiento es la comparación y revisión del desequilibrio de las covariables entre los conjuntos de píxeles de tratamiento y control (Olmos y Govindasamy, 2015). Para esto, la herramienta utiliza la diferencia normalizada (Imbens y Wooldridge, 2009), calculando la diferencia entre el conjunto de píxeles control y de tratamiento para cada covariable incluida en el modelo de selección. Los valores absolutos para la diferencia estandarizada que sean superiores al 25% indican un desequilibrio para esa covariable específica (Stuart y Rubin, 2008). Aunque es esperable que las covariables se encuentren altamente desequilibradas en la etapa pre-emparejamiento, el desequilibrio de cada una de las covariables en la etapa post-emparejamiento debe ser idealmente reducido y menor del 25% (Figura 2, panel D).

La segunda manera en la cual se evalúa qué tan eficiente fue el proceso de emparejamiento es mediante la comparación de las distribuciones de los puntajes de propensión. Es de esperar que en la etapa pre-emparejamiento, la forma como se distribuyen los puntajes de propensión en el conjunto control difiera de la distribución del tratamiento, mientras que dicha diferencia en las distribuciones se debe reducir notablemente en la etapa post-emparejamiento (Figura 2, panel E).

El emparejamiento depende de una superposición considerable de los valores de las covariables entre los grupos de tratamiento y control. Si no existe superposición, esto quiere decir que en la ventana de análisis no hay píxeles similares a los del tratamiento, por lo que el emparejamiento no es viable (Schleicher *et al.*, 2020). Esto se puede evidenciar cuando existe un alto desbalance ($>25\%$) en las diferencias normalizadas post-emparejamiento de cada covariable y en asimetrías significativas en las distribuciones de los puntajes de propensión post-emparejamiento. Aunque es posible corregir parcialmente algunos de estos problemas mediante el uso de ventanas de análisis más amplias, es importante reconocer que el emparejamiento no siempre es una solución universal, sino que debe ser parte de una estrategia integral de evaluación de impacto (Schleicher *et al.*, 2020).

Paso 5: Evaluación de impacto de la intervención (tratamiento)

Una vez realizado el emparejamiento estadístico que corrija buena parte de los sesgos originados por la distribución no aleatoria de las áreas de análisis, es posible evaluar el efecto de la intervención mediante la comparación de la variable respuesta entre los píxeles tratamiento y control. En *CONTRAFACTUAL*, la variable respuesta (pérdida o ganancia de bosque) se estima a partir de los cambios anuales reportados por el IDEAM y se estima para

cada uno de los años seleccionados dentro del periodo de evaluación. En la versión V.1 de la herramienta *CONTRAFCTUAL* es posible definir periodos de evaluación comprendidos entre 2013 y 2024. A medida que los datos oficiales de cambio en la superficie cubierta por bosque natural en Colombia sean publicados, serán incorporados en siguientes versiones de la herramienta.

El impacto de las intervenciones de conservación estimado por medio de *CONTRAFCTUAL* es resultado de cambios en la cantidad de bosque, y puede ser expresado de tres maneras, la pérdida de bosque, la ganancia de bosque, y el cambio neto de bosque (ganancias menos pérdidas). La pérdida de bosque es medida como la proporción de píxeles que, en un año definido, de acuerdo con el reporte del IDEAM, fueron considerados como deforestación. Para el caso de estimaciones basadas en muestras, el error de dicha estimación es calculado mediante el uso de intervalos de confianza derivados de una distribución binomial. De forma complementaria, la ganancia total de bosque corresponde a la proporción de píxeles que fueron reportados por IDEAM como pasando de ser no bosque a ser bosque regenerado durante el año evaluado. Las estimaciones de las proporciones de pérdida (o ganancia) de bosque y sus errores son realizadas tanto para el conjunto de píxeles tratamiento como para el conjunto control (**Figura 2**, panel F).

Finalmente, se comparan los resultados de pérdida, ganancia o cambio neto entre tratamiento y control mediante el uso de una prueba z de comparación de proporciones. El efecto del área de intervención en cada uno de los años evaluados es medido como el cambio (Δ), correspondiente al valor absoluto de la diferencia normalizada de las proporciones entre el tratamiento (x_1) y el control (x_2), la que es calculada como $100 \times |(x_2 - x_1)/x_2|$ y expresada como porcentaje. Es decir, el porcentaje de reducción o aumento de la variable respuesta en el tratamiento, relativo al control. Con el fin de identificar la dirección del efecto, para el cambio neto de bosque y la ganancia total de bosque, Δ se considera positivo si $x_1 > x_2$. Para el caso de la pérdida total de bosque, Δ se considera positiva si $x_1 < x_2$. De esta forma, un efecto Δ positivo implica que el tratamiento aumenta la cantidad de bosque dentro del área de estudio (para el cambio neto de bosque), reduce la deforestación o aumenta la ganancia de bosque, según corresponda. Por tanto, valores positivos de Δ son indicativos de que el área de estudio es efectiva en la protección del bosque.

En el caso de análisis multianuales, para establecer una medida de pérdida o ganancia de bosque, tanto para el tratamiento como para el control, *CONTRAFCTUAL* establece la proporción multianual acumulada como: $1 - (\prod_{i=1}^n (1 - p_i)) \times 100$, donde p_i corresponde a la proporción anual estimada para cada uno de los n años considerados en el tiempo de evaluación. Con base en dichas proporciones de pérdida o ganancia multianual acumulada, se establece el efecto acumulado en el periodo de evaluación usando la diferencia normalizada entre las proporciones, descrita anteriormente.

Estudios de caso

El propósito de los estudios de caso es ilustrar diferentes resultados, basados en ejemplos reales, que se pueden obtener con la herramienta *CONTRAFCTUAL*, y brindar claridad sobre su interpretación. Para esto realizamos un análisis del impacto sobre la reducción de la pérdida de bosque en áreas protegidas del sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN) con cobertura boscosa, en varias regiones del país. En estos casos las variables de respuesta estudiadas son la pérdida de bosque, la ganancia de bosque y el cambio total neto en cobertura de bosque. El área de intervención en cada caso es el polígono del PNN, y se asume que las actividades realizadas dentro de este polígono (control, vigilancia, etc.) buscan evitar y reducir la pérdida de bosque, entre otros objetivos. Así, el análisis busca responder la pregunta ¿Qué habría sucedido si el PNN (la intervención) no existiera?, evaluando la efectividad de cada área en evitar la deforestación.

Los casos se escogieron a partir del análisis de 23 áreas protegidas presentes en diversas regiones del país, que protegen diferentes tipos de ecosistemas boscosos (ej., bosques de tierras bajas, bosques andinos, bosques de galería) (**Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362>) y buscan mostrar varios

resultados posibles y su interpretación. La construcción y evaluación de modelos se realizó de forma estandarizada para todas las APs, usando como covariables cuantitativas Pendiente, Distancia a vías principales, Distancia a vías terciarias, Distancia a centros poblados y Distancia a ríos principales (Paso 2 arriba). No obstante, es de notar que no todas ellas fueron usadas en el modelo final de cada parque evaluado, pues para algunos de ellos estas variables estaban correlacionadas y por tanto pudieron ser descartadas. Además, se usó la capa de biomas de Colombia (Biomas IDEAM-Prell) como variable categórica. Con este conjunto de covariables, se realizaron los análisis descritos usando la herramienta *CONTRAFACTUAL* para evaluar el impacto de las APs en los cambios de la cobertura boscosa para el año 2024. Todos los análisis fueron realizados usando la opción de muestreo homogéneo de píxeles a 120 m.

Resultados

Evaluamos el impacto de 23 parques nacionales naturales en la protección de la cobertura boscosa por medio de la herramienta *CONTRAFACTUAL*. El impacto es presentado únicamente en términos de la pérdida de bosque, puesto que la ganancia anual de bosque en estas áreas, en el periodo analizado de solo un año, fue muy baja o nula. Los tiempos de cómputo oscilaron entre unos minutos (ej. Cueva de los Guácharos) y unas pocas horas (ej. Tinigua), dado el rango de variación en los tamaños de los PNN y las ventanas de análisis.

Para buena parte de los parques estudiados (87%), el emparejamiento logró corregir adecuadamente los desbalances en las covariables entre el tratamiento y el control (**Figura 3, Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362>). Sin embargo, para algunas APs, el emparejamiento no resultó en un buen balance de algunas covariables entre el tratamiento y el control (**Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362>). Para mejorar este balance y por tanto el emparejamiento, corrimos de nuevo estas APs usando dos ajustes. El primero consistió en ampliar la ventana de análisis para permitir al algoritmo tener más píxeles de búsqueda. El segundo, para el caso de APs con ecosistemas no boscosos, fue recortar estos ecosistemas del polígono de intervención, para evitar que el emparejamiento buscara píxeles similares a píxeles tratamiento que no son bosque. Estos ajustes permitieron mejorar el emparejamiento de las APs Yaigojé Apaporis, Tatamá y Sanquianga (**Figuras 2S-4S, Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362>).

Los resultados muestran una variedad en la magnitud y dirección del efecto de los PNN estudiados sobre la variable respuesta pérdida de bosque (**Figura 3, Tabla S2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362>). El efecto en la pérdida de bosque, estimado para aquellas APs en las que el emparejamiento resultó efectivo y el efecto fue significativo, varió entre -54% (efecto negativo, el AP presenta una mayor pérdida de bosque que el control) y 100% (efecto positivo, reducción total de la pérdida de bosque en comparación al control), siendo en promedio de 73,6% (SD=28,89; n = 16). De acuerdo con esto, de manera general, estas áreas protegidas presentaron efectos positivos de protección, reduciendo la pérdida de bosque (**Figura 3**). Sin embargo, para algunos casos (denotados en gris en la **Figura 3**) el efecto del parque (sea este negativo o positivo) no fue significativo. Ello quiere decir que el cambio en cobertura de bosque en el tratamiento es estadísticamente indistinguible de aquel en el control y se considera entonces que no hay evidencia de un efecto (el PNN ni reduce ni aumenta la deforestación). En los casos de estudio que se presentan a continuación, se describe la forma en que se pueden interpretar los resultados para cada área.

Estudio de caso 1

El primer estudio de caso muestra un PNN que reduce la pérdida de bosque y otro que no tiene efecto en esta variable respuesta. Corresponde a los resultados de deforestación en los PNN Farallones de Cali (**Figura 4A**) y Sumapaz (**Figura 4B**) en el año 2024. En cada caso se compara la estimación de la proporción de bosque perdido en el parque (morado) con la

estimación para el área definida como control (gris) por el análisis de emparejamiento. Para el caso del parque Farallones de Cali, se establece que la proporción de bosque perdido fue menor dentro del parque (0.005%) que en el área control (0.028%), indicando que el parque tuvo un efecto positivo, en tanto que redujo la pérdida de bosque. Así, el efecto del parque (Δ) muestra que el parque redujo la pérdida de bosque en un 83% (Figura 4A).

En contraste, el parque Sumapaz en el mismo año presenta una mayor pérdida de bosque (0.044%) que su área control correspondiente (0.029%), por lo que el efecto estimado del parque sería negativo ($\Delta = -53.9\%$). Sin embargo, dicha diferencia no es estadísticamente significativa, por lo cual se asume que las pérdidas en el control y en el tratamiento son indistinguibles y por tanto no hay evidencia de un efecto del parque sobre la deforestación.

Así, este primer estudio de caso ilustra dos parques que presentan efectos distintos, uno reduciendo la pérdida de bosque (Farallones de Cali con un efecto positivo) y otro sin un efecto en la protección del bosque (diferencia no significativa en la pérdida entre el tratamiento y el control).

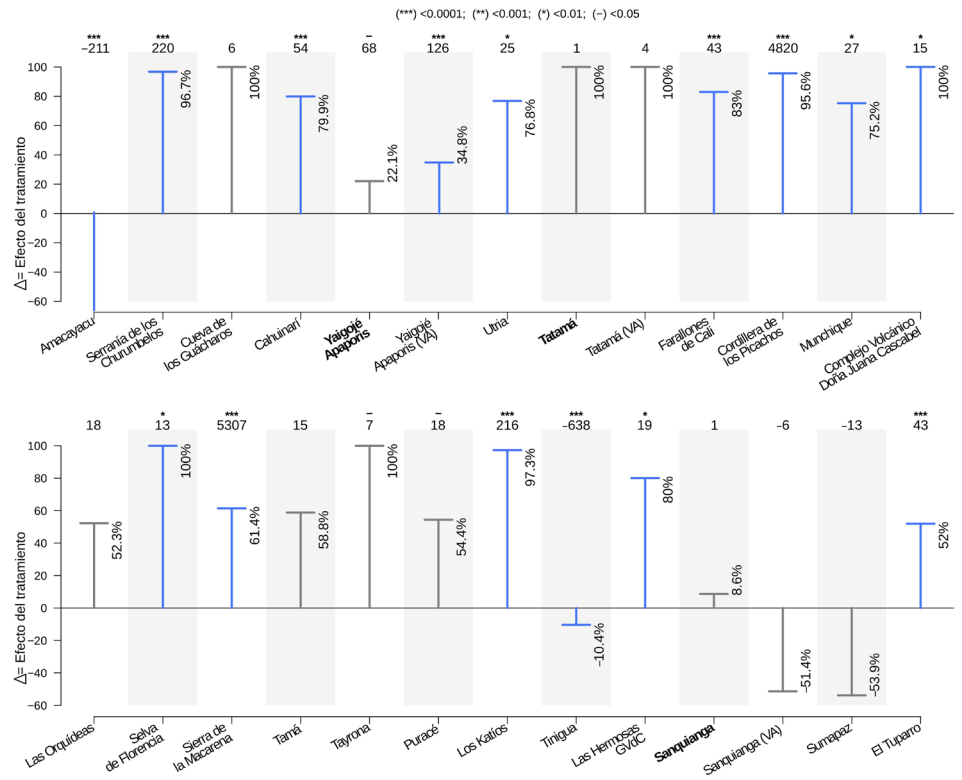


Figura 3. Resumen de los análisis contrafactuales de cambio en la cobertura de bosque en 23 PNN en el año 2024. Los PNN se encuentran ordenados de izquierda a derecha de acuerdo con el porcentaje de su extensión de bosque. Para cada uno de los parques se muestra el efecto estimado del parque (Δ) en términos de la pérdida total de bosque. El efecto de cada parque (Δ) se muestra como el porcentaje de cambio respecto al control (ver Métodos). Para los parques indicados en negrilla el emparejamiento estadístico no logró reducir completamente las diferencias entre las covariables del tratamiento y el control. La significancia estadística del efecto del parque (i.e., diferencia entre el control y el tratamiento) se establece mediante una prueba z de comparación de proporciones y es mostrada en la parte superior de cada parque usando la notación: (***) <0.0001, (**) <0.001, (*) <0.01, (-) <0.05. Debajo de cada indicativo de significancia se muestra la pérdida de bosque evitada por el parque medida en hectáreas. Valores de efecto (Δ) menores a -60% no se muestran en la figura, pero pueden ser consultados en la Tabla 1S. Los parques a los que les acompaña la sigla VA corresponden a modelos en los que la ventana de observación usada incluye algunos municipios adicionales a los sugeridos por defecto por la herramienta (ver Figuras 2S-4S).

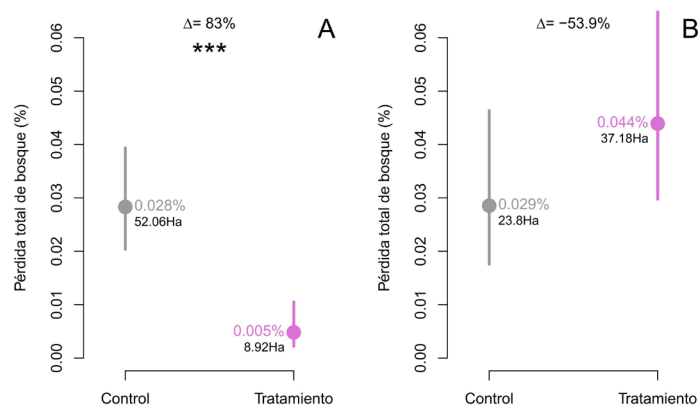


Figura 4. Resultados de la pérdida de bosque en 2024 para dos parques nacionales naturales de Colombia, Farallones de Cali (A) y Sumapaz (B). Se muestran los valores de pérdida total de bosque calculados (círculo) y su intervalo de confianza (barra), para el control (gris) y el tratamiento, es decir el área protegida (púrpura), así como el equivalente en hectáreas del área de bosque perdida. La diferencia entre el control y el tratamiento, correspondiente al efecto de la intervención en el tratamiento, es expresada como la razón de cambio (Δ). La diferencia estadística entre el control y tratamiento identificada mediante una prueba z de comparación de proporciones es indicada usando la notación: (***) <0.0001, (**) <0.001, (*) <0.01, (-) <0.05.

Estudio de caso 2

Este caso muestra los resultados de los parques Los Katíos y Ensenada de Utría (**Figura 5**). En este ejemplo dos parques tuvieron porcentajes similares de pérdida de bosque en su interior durante el año 2024 (cercano al 0,014%), pero presentan resultados notablemente diferentes en su efecto de protección. Mientras el efecto de Los Katíos es una reducción en la pérdida total de bosque del 97%, para el parque Utría el efecto es del 77% (**Figura 5**). Ello quiere decir, el efecto del área protegida en controlar la pérdida de bosque es diferente entre las dos áreas, aunque la pérdida proporcional de bosque dentro del área protegida es similar. El parque Los Katíos controla la pérdida de bosque casi en su totalidad evitando que se pierdan 216 hectáreas, mientras Utría logra reducirla en tres cuartas partes (que no es una reducción despreciable y equivalente a 25 hectáreas evitadas). Debido a las condiciones socioambientales de contexto y a la pérdida de bosque esperada para un área equivalente (control), el desempeño de cada parque en la prevención de la deforestación es distinto, a pesar de que pierden una proporción similar de bosque, resultando en que Los Katíos tuvo el mayor efecto protector en comparación con Utría, en el año 2024.

Estudio de caso 3

Este caso evalúa la pérdida de bosque en el PNN Tinigua, año a año, durante el periodo 2019 a 2024 (**Figura 6A**). Este es un ejemplo de lo que sería un uso común de la herramienta en un área protegida a lo largo del tiempo. Los resultados indican que, para la mayoría de los años evaluados, exceptuando los años 2021 y 2023, el parque presentó una pérdida total de bosque mayor que el control y por tanto un efecto negativo. En general, la proporción de pérdida de bosque varió entre 4,1% y 0,5%, mientras que el efecto del parque varió entre -72.6% (2019) y 21% (2023). De esta forma, mientras en el 2019 el parque tuvo un exceso de pérdida de bosque, respecto a lo esperado en el control, en el 2023 el parque contuvo cerca de un cuarto de la pérdida esperada de bosque. En el año 2021 la diferencia entre el tratamiento y el control no fue significativa, es decir ese año el parque no tuvo efecto, ni aumentando ni reduciendo la deforestación.

Para el periodo completo de análisis, la pérdida acumulada del parque fue de poco más del 17%, mientras que para el control fue aproximadamente del 14%, lo que corresponde a un efecto acumulado del parque de un -26% (**Figura 6B**). Esto es, el parque presentó una

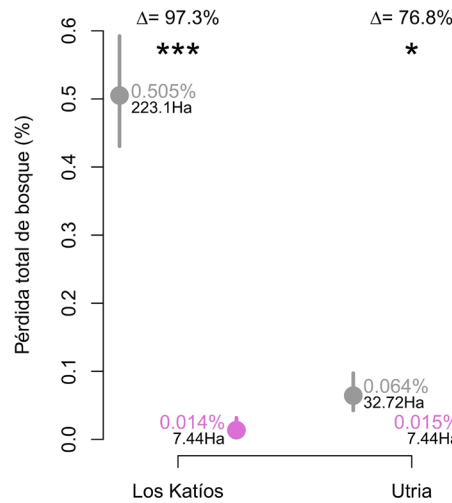


Figura 5. Resultados de la pérdida de bosque en 2024 para dos parques nacionales naturales de Colombia, Los Katíos y Utria. Se muestran los valores de pérdida total de bosque calculados (círculo) y su intervalo de confianza (barra), para el control (gris) y el tratamiento (púrpura), así como el equivalente en hectáreas del área de bosque pérdida en el tratamiento y el control. La diferencia entre el control y el tratamiento, correspondiente al efecto de la intervención en el tratamiento, es expresado como el porcentaje de cambio (Δ). La diferencia estadística entre el control y tratamiento identificada mediante una prueba z de comparación de proporciones es indicada sobre el tratamiento usando la notación: (***) <0.0001 , (**) <0.001 , (*) <0.01 , (-) <0.05 .

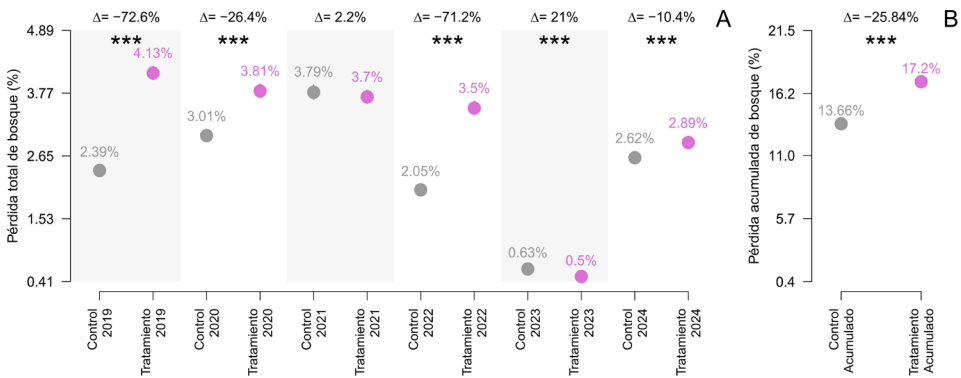


Figura 6. Resultados del análisis contrafactual para el parque nacional natural Tinigua para el periodo 2019 – 2024, indicando el efecto año a año (A) y el efecto acumulado para todo el periodo (B). Se muestran los valores de pérdida total de bosque estimados (círculo) y su intervalo de confianza (barra), para el control (gris) y el tratamiento (púrpura). La diferencia entre el control y el tratamiento, correspondiente al efecto de la intervención en el tratamiento, expresado como la razón de cambio (Δ). La diferencia estadística entre el control y tratamiento identificada mediante una prueba z de comparación de proporciones es indicada sobre el tratamiento usando la notación: (***) <0.0001 , (**) <0.001 , (*) <0.01 , (-) <0.05 .

pérdida de bosque mayor a la pérdida presentada por el control. Así, para el periodo de análisis, el parque Tinigua en vez de contener la deforestación, parece ser un atractor de ésta en la región, aunque dicha condición ha variado en el tiempo. Es importante notar que para el caso del parque Tinigua, los municipios que intersecan al parque y que configuran la ventana de análisis también contienen parte del parque Serranía de la Macarena. Por ello, para el análisis del parque Tinigua, el parque Serranía de la Macarena fue excluido de la ventana de observación con el fin de evitar sobreestimaciones del efecto del parque Tinigua.

Discusión

La herramienta *CONTRAFACTUAL* permitió el análisis de los patrones de pérdida de bosque en diferentes APs de Colombia y la evaluación del impacto de cada área en la conservación de dichos bosques. El ejercicio muestra la importancia de analizar cada AP de manera individual y de escoger muy bien las covariables a ser usadas en el emparejamiento, es decir, las covariables que pueden estar relacionadas con la probabilidad de deforestación en la región. Era de esperarse que no todos los emparejamientos quedaran bien balanceados al inicio, pues se hicieron de forma estandarizada, usando las mismas covariables para todas las áreas. En la práctica, al usar *CONTRAFACTUAL*, el usuario deberá seleccionar muy bien las variables que son relevantes en su caso, ya que incluir variables que no sean relevantes puede forzar el modelo a encontrar píxeles parecidos en esas variables, sacrificando las variables más importantes. Es decir, lo esencial es lograr balancear aquellas variables que han sido priorizadas previamente.

Los ajustes realizados, ampliar la ventana de análisis y recortar los ecosistemas no boscosos, permitieron mejorar el emparejamiento de algunas APs. En versiones futuras de la herramienta, también se podría usar un umbral de corte en las diferencias entre los valores de propensión de cada píxel de control y tratamiento (*caliper*). Esto para forzar a que el emparejamiento solo sea posible cuando haya una similitud suficiente entre los valores de propensión del píxel de control y el del tratamiento, y en el caso donde esto no sea posible, ese píxel se descarte del análisis de emparejamiento. Otra alternativa es que después del análisis de emparejamiento también se pueden remover sistemáticamente los píxeles emparejados que tengan la diferencia más alta entre los puntajes de propensión hasta que el desbalance entre las variables sea menor a 25%. Sin embargo, esto implica reducir el número de píxeles analizados. Considerando que, en muchos casos, por tiempos computacionales, se usa la opción de muestreo, que disminuye considerablemente el número de píxeles, estas alternativas deben ser estudiadas y probadas primero, para entender los posibles efectos en los resultados.

Por otro lado, hay casos en los que un modelo imperfecto o levemente desbalanceado es el mejor resultado posible, lo que no quiere decir que no sea informativo. También debe considerarse que puede haber casos en que un área de intervención sea tan particular en sus características, que no sea posible encontrar un control exacto.

Los resultados mostraron que la mayoría de las áreas protegidas tuvieron un efecto positivo en la reducción de la deforestación, conteniendo la pérdida de bosque en comparación con escenarios contrafactuales, mientras que algunas pocas, como el PNN Tinigua, tuvieron un efecto negativo, perdiendo más bosque de lo esperado en comparación con áreas no protegidas similares. De esta forma, la magnitud y dirección del efecto protector de los Parques Nacionales Naturales estudiados fue diverso y contexto-dependiente. Otros estudios cuantitativos previos han demostrado que en Colombia las áreas protegidas y otros sistemas de gobernanza como los resguardos indígenas y los territorios colectivos tienen un efecto en la reducción de la deforestación, pero este efecto varía entre regiones y entre áreas, de acuerdo con múltiples factores (Armenteras *et al.*, 2009; Negret *et al.*, 2020; Vélez *et al.*, 2020). Por esto, la evaluación y comprensión del efecto de cada área, de manera individual, es necesaria para entender los factores que la hacen más efectiva en un periodo determinado y tomar decisiones sobre su manejo. La herramienta *CONTRAFACTUAL* busca proporcionar la posibilidad de hacer un análisis de efectividad en áreas protegidas o programas de conservación basados en área, usando información oficial de alta resolución, de una manera práctica y útil para tomadores de decisiones.

Es importante resaltar que los resultados de cada análisis son exclusivos al período de tiempo estudiado. Como se mostró para el parque Tinigua, un área protegida puede tener un efecto en un periodo determinado y, por distintos factores, tener un efecto diferente en un período distinto (ej. cambios en capacidad operativa, aumento o reducción de capacidad de control, variaciones en la tasa de deforestación de la región donde se encuentra). Los análisis con escenarios contrafactuales permiten entender estas dinámicas temporales

particulares. El seguimiento de cada AP a lo largo del tiempo permite al tomador de decisiones o al encargado del área evaluar el impacto de las acciones implementadas en un periodo determinado, entender los factores asociados a los resultados en dicho periodo, y así planificar las respuestas necesarias con relación al manejo del área.

Los análisis contrafactuales realizados con esta herramienta permiten también superar una limitación común de muchos indicadores de efectividad en APs, que usualmente evalúan el cumplimiento de objetivos de gestión, más no el impacto real sobre la conservación de la biodiversidad (Boitani *et al.*, 2008). Inclusive estos estimativos de efectividad basados en contrafactuales podrían complementar indicadores globales como PAME (Efectividad del Manejo de Áreas Protegidas) y MEPCA (Efectividad del Manejo de Áreas Protegidas y OECM), vinculados a la Meta 3 del Marco Mundial de Biodiversidad de Kunming-Montreal (CBD, 2022) que, si bien se orientan a evaluar la efectividad del manejo, no cuentan con una herramienta o metodología estandarizada de reporte y monitoreo del impacto. Esto ha llevado a que muchos países informen principalmente sobre procesos e insumos de gestión (por ejemplo, inversión o ampliación de áreas) o extensión del área protegida en el país, en lugar de resultados basados en impactos causales sobre la biodiversidad.

En este sentido, el enfoque contrafactual que incorpora esta herramienta proporciona a los tomadores de decisión una alternativa práctica y rigurosa para demostrar la efectividad (entendida como el impacto) en la conservación de bosques. Adicionalmente, ayuda a orientar mejor la administración de sus áreas y justificar su contribución al cumplimiento de metas de conservación en distintas escalas. La evidencia generada también facilita el monitoreo estandarizado en áreas de diversos tamaños y contextos, así como la movilización de recursos financieros para fortalecer y escalar las estrategias de conservación. Finalmente, la herramienta también es útil para el rol de la sociedad civil como veedor de la inversión pública en la conservación de la biodiversidad, permitiendo una evaluación objetiva del impacto de las áreas protegidas.

Conclusiones y perspectivas

El análisis de efectividad de un área de conservación debe ser realizado acorde a los objetivos y metas trazadas para el área. La evaluación de impacto derivada de la aplicación *CONTRAFACTUAL* es útil para evaluar el efecto de un área de conservación u otras estrategias basada en área en la protección del bosque. Reconocemos que existen otros objetivos y metas particulares en las APs, distintas a la conservación del bosque, que están más allá del alcance de esta herramienta y deberán ser evaluadas con otros métodos, idealmente con aproximaciones contrafactuales pertinentes.

La herramienta ha sido diseñada específicamente para Colombia, para facilitar su uso minimizando el pre-procesamiento de los datos en sistemas de información geográfica (SIG), utilizando información oficial para el país, y será actualizada a medida que dicha información sea disponible. En su primera versión la herramienta se basa en emparejamiento estadístico usando puntajes de propensión. En futuras versiones de la herramienta se podrán incluir opciones adicionales para reducir el efecto de la autocorrelación espacial, reducir la carga computacional y otras opciones analíticas.

Esperamos que el uso de *CONTRAFACTUAL* estimule la aplicación de evaluaciones rigurosas de impacto en ejercicios de conservación en el país, y que incentive la comprensión y el aprendizaje sobre los métodos contrafactuales. De esta forma, avanzar en la identificación de las estrategias que funcionan mejor en determinados contextos y con ello, contribuir a fortalecer las capacidades analíticas de organizaciones públicas y privadas involucradas en el desarrollo de proyectos de conservación basados en área.

Información Suplementaria

El Manual de uso de la herramienta se encuentra disponible [aquí](https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362) y los demás materiales en Información Suplementaria, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362>.

Datos y código

La herramienta completa está disponible [aquí](#). El código fuente para los diferentes subanálisis que componen el análisis contrafactual, así como el código de la Shiny app está disponible [aquí](#).

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado y apoyado por Wildlife Conservation Society, Bezos Earth Fund, Wyss Academy for Nature y Ecopetrol S.A a través del Proyecto Vida Silvestre.

Contribución de los autores

GFM, PJN, FJA, VJR: participaron en la concepción del estudio, el diseño metodológico y la redacción inicial del manuscrito; **GFM, PJN, FJA, VJR, SJA:** contribuyeron al desarrollo del marco analítico, el análisis de resultados y la revisión crítica del texto y aportaron a la interpretación de los resultados, la discusión y la edición final del manuscrito. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final enviada a la revista.

Conflicto de Interés

Los autores no poseen ningún conflicto de interés que pueda influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación.

Referencias

- Andam, K. S., Ferraro, P. J., Pfaff, A., Sanchez-Azofeifa, G. A., Robalino, J. A.** (2008). Measuring the effectiveness of protected area networks in reducing deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(42), 16089-16094. <https://doi.org/10.1073/pnas.0800437105>
- Armenteras, D., Rodríguez, N., Retana, J.** (2009). Are conservation strategies effective in avoiding the deforestation of the Colombian Guyana Shield? *Biological Conservation*, 142(7), 1411-1419. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.002>
- Baylis, K., Honey-Rosés, J., Börner, J., Corbera, E., Ezzine-de-Blas, D., Ferraro, P. J., Lapeyre, R., Persson, U. M., Pfaff, A., Wunder, S.** (2016). Mainstreaming Impact Evaluation in Nature Conservation. *Conservation Letters*, 9(1), 58-64. <https://doi.org/10.1111/conl.12180>
- Boitani, L., Cowling, R. M., Dublin, H. T., Mace, G. M., Parrish, J., Possingham, H. P., Pressey, R. L., Rondinini, C., Wilson, K. A.** (2008). Change the IUCN protected area categories to reflect biodiversity outcomes. In *PLoS Biology* (Vol. 6, Issue 3, pp. 0436-0438). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060066>
- Burivalova, Z., Miteva, D., Salafsky, N., Butler, R. A., Wilcove, D. S.** (2019). Evidence Types and Trends in Tropical Forest Conservation Literature. *Trends in Ecology & Evolution*, 34(7), 669-679. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.03.002>
- Convention on Biological Diversity (CBD).** (2022). *Kunming–Montreal Global Biodiversity Framework*. CBD/COP/15/L.25. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Canada. Recuperado el 10 de octubre de 2025 de <https://www.cbd.int/gbf>
- Ferraro, P. J.** (2009). Counterfactual thinking and impact evaluation in environmental policy. In M. Birnbaum & P. Mickwitz (Eds.), *Environmental program and policy evaluation: Addressing methodological challenges. New Directions for Evaluation* (Vol. 122, pp. 75-84). <https://doi.org/10.1002/ev>
- Ferraro, P. J., Hanauer, M. M.** (2014). Advances in measuring the environmental and social impacts of environmental programs. In *Annual Review of Environment and Resources* (Vol. 39, pp. 495-517). Annual Reviews Inc. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101813-013230>
- Ferraro, P. J., Pattanayak, S. K.** (2006). Money for nothing? A call for empirical evaluation of biodiversity conservation investments. *PLoS Biology*, 4(4), 482-488. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040105>
- Ferraro, P. J., Pressey, R. L.** (2015). Measuring the difference made by conservation initiatives: Protected areas and their environmental and social impacts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1681). <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0270>
- Forero-Medina, G., Joppa, L.** (2010). Representation of global and national conservation priorities by Colombia's protected area network. *PLoS ONE*, 5(10), 1-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013210>

- González-González, A., Villegas, J. C., Clerici, N., Salazar, J. F.** (2021). Spatial-temporal dynamics of deforestation and its drivers indicate need for locally-adapted environmental governance in Colombia. *Ecological Indicators*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107695>
- Ho, D. E., Imai, K., King, G., Stuart, E. A.** (2011). MatchIt: Nonparametric Preprocessing for Parametric Causal Inference. In *JSS Journal of Statistical Software* (Vol. 42). <http://www.jstatsoft.org/>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).** (2025). Resultados Monitoreo de Bosques. Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono, Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental, IDEAM, Colombia. Recuperado el 15 de noviembre de 2025 de <https://www.ideam.gov.co/transparencia/datos-abiertos/seccion-de-datos-abiertos/resultados-monitoreo-de-bosques>
- Imbens, G. W., Wooldridge, J. M.** (2009). Recent developments in the econometrics of program evaluation. *Journal of Economic Literature*, 47(1), 5-86. <https://doi.org/10.1257/jel.47.1.5>
- Johnsson, T.** (1992). A procedure for stepwise regression analysis. *Statistical Papers*, 33, 21-29.
- Joppa, L. N., Loarie, S. R., Pimm, S. L.** (2008). On the protection of “protected areas.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(18), 6673-6678. <https://doi.org/10.1073/pnas.0802471105>
- Joppa, L. N., Pfaff, A.** (2009). High and far: Biases in the location of protected areas. *PLoS ONE*, 4(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008273>
- Joppa, L. N., Pfaff, A.** (2011). Global protected area impacts. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1712), 1633-1638. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.1713>
- Joppa, L., Pfaff, A.** (2010). Reassessing the forest impacts of protection: The challenge of nonrandom location and a corrective method. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185(January 2010), 135-149. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05162.x>
- Langhammer, P. F., Bull, J. W., Bicknell, J. E., Oakley, J. L., Brown, M. H., Bruford, M. W., Butchart, S. H. M., Carr, J. A., Church, D., Cooney, R., Cutajar, S., Foden, W., Foster, M. N., Gascon, C., Geldmann, J., Genovesi, P., Hoffmann, M., Howard-McCombe, J., Lewis, T., ... Brooks, T. M.** (2024). The positive impact of conservation action. *Science*, 384(6694), 453-458. <https://doi.org/10.1126/science.adj6598>
- Negret, P. J., Di-Marco, M., Sonter, L. J., Rhodes, J., Possingham, H. P., Maron, M.** (2020). Effects of spatial autocorrelation and sampling design on estimates of protected area effectiveness. *Conservation Biology*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/cobi.13522>
- Neugarten, R., Rodewald, A., Eklund, J., O'Garra, T.** (2025). An introduction to impact evaluation for conservation. In *Conservation Science and Practice* (Vol. 7, Issue 11). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/csp2.70169>
- Olmos, A., Govindasamy, P.** (2015). Propensity Scores: A Practical Introduction Using R. In *Journal of MultiDisciplinary Evaluation* (Vol. 11). <http://www.jmde.com>
- Ribas, L. G. dos S., Pressey, R. L., Loyola, R., Bini, L. M.** (2020). A global comparative analysis of impact evaluation methods in estimating the effectiveness of protected areas. In *Biological Conservation* (Vol. 246). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108595>
- Rosenbaum, P. R., Rubin, D. B.** (1983). The Central Role of the Propensity Score in Observational Studies for Causal Effects. In *Biometrika* (Vol. 70, Issue 1).
- Schleicher, J., Eklund, J., D. Barnes, M., Geldmann, J., Oldekop, J. A., Jones, J. P. G.** (2020). Statistical matching for conservation science. *Conservation Biology*, 34(3), 538-549. <https://doi.org/10.1111/cobi.13448>
- Stuart, E. A.** (2010). Matching methods for causal inference: A review and a look forward. In *Statistical Science* (Vol. 25, Issue 1, pp. 1-21). <https://doi.org/10.1214/09-STS313>
- Stuart, E. A., Rubin, D. B.** (2008). Matching with multiple control groups with adjustment for group differences. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 33(3), 279-306. <https://doi.org/10.3102/1076998607306078>
- VanderWeele, T. J.** (2019). Principles of confounder selection. *European Journal of Epidemiology*, 34(3), 211-219. <https://doi.org/10.1007/s10654-019-00494-6>
- Vélez, M. A., Robalino, J., Cardenas, J. C., Paz, A., Pacay, E.** (2020). Is collective titling enough to protect forests? Evidence from Afro-descendant communities in the Colombian Pacific region. *World Development*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104837>
- Wolf, C., Levi, T., Ripple, W. J., Zárrate-Charry, D. A., Betts, M. G.** (2021). A forest loss report card for the world's protected areas. *Nature Ecology & Evolution*, 5(4), 520-529. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01389-0>