

Análisis espaciotemporal y modelado predictivo del blanqueamiento coralino en el Océano Atlántico (2000–2020)

Proyecto de Herramientas para Ciencia de Datos I CA0204

Emily Estefanía Mora Contreras C4H522

Resumen (Abstract)

Este estudio analiza la dinámica temporal y espacial del blanqueamiento coralino en el Atlántico entre 2000 y 2020, utilizando datos ecológicos y oceanográficos de la base BCO-DMO. Los resultados muestran dos picos importantes de blanqueamiento (2005 y 2014–2015), asociados a fuertes anomalías térmicas. Espacialmente, las Antillas y el Caribe occidental registran los valores más altos, mientras que regiones como Brasil presentan menor afectación. La anomalía máxima de temperatura superficial (SSTA), la distancia a la costa y la exposición se identificaron como factores relevantes. El modelo Random Forest predijo adecuadamente valores bajos y medios, pero subestimó eventos severos. Estos hallazgos aportan evidencia sobre los principales motores del blanqueamiento coralino y su distribución en el Atlántico, ofreciendo bases para mejorar el monitoreo y la gestión de arrecifes.

Introducción

Los arrecifes de coral son ecosistemas marinos altamente diversos y productivos, debido a su extraordinaria biodiversidad (Spalding et al., 2001). Estos sistemas están formados principalmente por corales escleractinios, que en escencia de componen de cnidarios de la subclase Hexa-

corallia, organismos coloniales cuyas estructuras están hechas de carbonato de calcio (CaCO_3). Su funcionamiento depende en gran medida de una relación simbiótica con microalgas unicelulares del género *Symbiodinium* (comúnmente conocidas como Zooxanthellae, que en latín significa “animales amarillos pequeños”), que viven en los tejidos del coral (Muscatine & Porter, 1977). Sin embargo, esta simbiosis es altamente sensible a las variaciones ambientales, especialmente al aumento de la temperatura del mar y a las anomalías en temperatura prolongadas (Glynn, 1993).

El blanqueamiento de los corales se ha convertido en una de las mayores amenazas ambientales para los ecosistemas marinos tropicales a nivel global. La combinación de calentamiento oceánico, acidificación, contaminación y eventos extremos está provocando pérdidas significativas en la cobertura coralina y alteraciones irreversibles en las comunidades de arrecifes de coral (Eakin et al., 2019; Donner et al., 2017).

Así, es preciso llevar a cabo una evaluación que permita el análisis de cuáles son los fenómenos que inciden más en el blanqueamiento de arrecifes de coral, en el Océano Atlántico, dado que estos organismos son esenciales para mantener el ecosistema marino. Para complementar el análisis, se planteó el uso de un modelo de predicción *Random Forest*, de manera que se haga un análisis del problema del blanqueamiento de

los arrecifes de coral en un futuro.

Planteamiento del problema

A pesar de que el blanqueamiento ha sido ampliamente documentado en el Pacífico e Índico, el Atlántico tropical y subtropical presenta particularidades ambientales que hacen interesante una evaluación específica. Comprender cómo estos factores interactúan es esencial para identificar áreas más vulnerables o resilientes y orientar estrategias de manejo y conservación de arrecifes del Atlántico. Por esto, el proyecto se hace en base a el Atlántico.

Objetivo general

- Analizar la dinámica espaciotemporal del blanqueamiento coralino en el Atlántico (2000–2020) y predecir su comportamiento a partir de variables ambientales y oceanográficas clave.

Metodología y Desarrollo

El análisis se realizó mediante técnicas estadísticas y un modelo de predicción tipo Random Forest, implementado en la herramienta RStudio. El objetivo principal fue estimar la respuesta del blanqueamiento coralino ante variaciones ambientales y espaciales, utilizando datos de monitoreo ecológico.

El estudio abarcó el período 2000–2020, caracterizado por la ocurrencia de múltiples eventos de blanqueamiento masivo y por la disponibilidad de registros consistentes. La base de datos utilizada proviene del repositorio Biological and Chemical Oceanography Data Management Office (BCO-DMO) —versión 2— compilada por Woesik y Burkepile (2022).

Delimitación espacial y temporal

El análisis se restringió al océano Atlántico, dividido en tres subregiones:

- **Atlántico occidental tropical:** mar Caribe, golfo de México y costas de Brasil.
- **Atlántico central:** Bermudas y zonas oceánicas intermedias.
- **Atlántico oriental:** costas de África occidental (Cabo Verde, Senegal, Guinea, entre otras).

Las unidades espaciales de referencia corresponden a los Reinos y Ecorregiones Marinas (MEOW) definidas para esta cuenca. El estudio se centró exclusivamente en el blanqueamiento coralino como respuesta ecológica a factores ambientales, excluyendo variables antrópicas como contaminación, pesca o urbanización costera.

Variables utilizadas en el estudio

Las variables se agruparon en tres categorías principales:

- **Ambientales:** temperatura media, anomalías térmicas, turbidez, velocidad del viento y frecuencia de ciclones.
- **Ecológicas:** cobertura coralina, presencia de macroalgas, tipo de sustrato y profundidad.
- **Espaciales:** coordenadas geográficas, distancia a la costa y grado de exposición.

Procesamiento de los datos

La preparación de los datos se realizó en RStudio empleando la librería dplyr. Se ejecutaron las siguientes etapas:

Limpieza y depuración: tratamiento de valores faltantes y atípicos. Para los datos numéricos se sustituyeron los valores extremos mediante la mediana y se aplicó el método IQR (1,5) para detección de outliers.

Visualización exploratoria: se generaron gráficos de líneas, barras, pastel, heatmaps y smooth plots mediante ggplot2, complementados con las librerías RColorBrewer y colorRampPalette para escalas cromáticas suavizadas.

Exploración descriptiva: se analizaron tendencias temporales y patrones espaciales de las variables clave, con el fin de identificar correlaciones preliminares con el porcentaje de blanqueamiento.

Modelo predictivo

Durante la etapa de modelado, se implementó un algoritmo de bosque aleatorio de regresión (Random Forest) mediante la librería ranger. El modelo tuvo como objetivo predecir el porcentaje de blanqueamiento coralino (Percent_Bleaching) a partir de cuatro predictores principales:

- anomalía máxima de temperatura superficial del mar (SSTA_Maximum),
- frecuencia de ciclones tropicales (Cyclone_Frequency),
- latitud absoluta (Lat.abs), que representa la distancia al ecuador, y
- año de registro (Date_Year), que captura las tendencias temporales.

Los valores faltantes fueron eliminados para asegurar la consistencia del entrenamiento. Posteriormente, los datos se dividieron en 80 % para entrenamiento y 20 % para validación independiente.

El modelo se configuró con los siguientes parámetros:

- num.trees = 600: número de árboles de decisión.
- mtry = 3: número de variables candidatas evaluadas en cada nodo.
- min.node.size = 5: tamaño mínimo de nodo terminal.
- importance = ‘permutation’ para estimar la importancia de cada predictor.

Estos ajustes buscaron maximizar la diversidad entre árboles y reducir el sobreajuste, manteniendo una estructura equilibrada del bosque.

El funcionamiento del Random Forest se basa en la generación de múltiples árboles de decisión sobre subconjuntos aleatorios de datos y predictores (bagging), cuyos resultados se promedian para obtener la predicción final. Este enfoque no requiere supuestos de linealidad o normalidad, y permite capturar interacciones complejas entre las variables.

Discusión y Resultados

Tendencia de blanqueamiento de arrecifes de coral de 2000-2020

En cuanto a la dimensión temporal, la serie de porcentaje promedio de blanqueamiento muestra dos picos muy marcados: uno alrededor de 2005 y otro entre 2014 y 2015. El máximo en 2005 coincide con un evento masivo de blanqueamiento en el Caribe y el Atlántico tropical occidental, caracterizado por una acumulación sin precedentes de estrés térmico (Eakin et al., 2010; Simonti et al., 2010). Este pulso sugiere

que en años con anomalías térmicas elevadas, la respuesta de los corales es rápida y amplia, con valores regionales que alcanzaron cerca del 30–35 %. El segundo aumento (2014–2015) se alinea con el tercer evento global de blanqueamiento, donde el Atlántico-Caribe tuvo una sensibilidad mayor que otras cuencas oceánicas (Eakin et al., 2020). Entre estos picos, los valores retornan a niveles moderados, lo que puede indicar cierta recuperación de los arrecifes, aunque la recurrencia de eventos severos plantea interrogantes sobre la resiliencia a largo plazo.

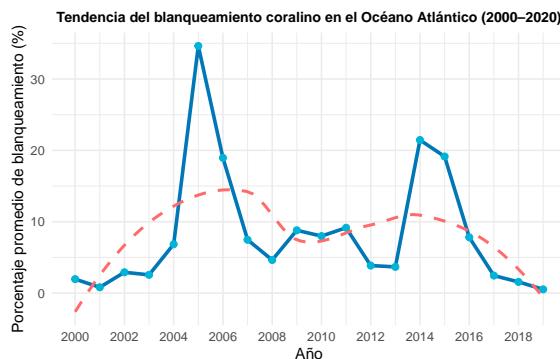


Figura 1: Tendencia del blanqueamiento coralino en el Océano Atlántico (2000–2020)

Porcentajes de blanqueamiento por ecorregión

Espacialmente, los promedios por ecorregión revelan que las Antillas (Hispaniola–Puerto Rico–Lesser Antilles) y Belice–Caribe occidental presentan los valores más altos de blanqueamiento. Esto respalda el objetivo de comparar subregiones atlánticas: la severidad del blanqueamiento es mayor en el Caribe central-occidental que en regiones como Brasil o África occidental, lo cual sugiere que factores regionales (circulación, retención térmica, plataforma somera) modulaban la respuesta coralina.

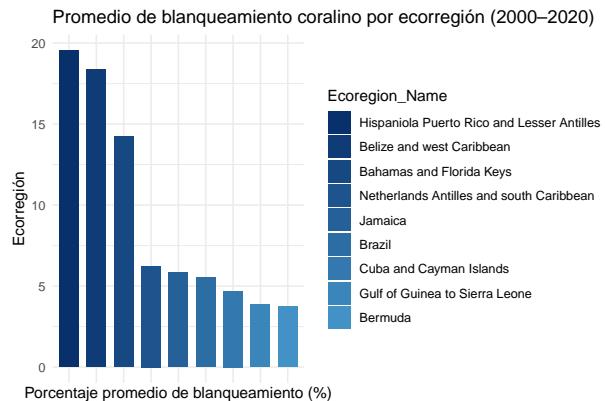


Figura 2: Promedio de blanqueamiento coralino por ecorregión (2000–2020)

Exposición en relación con el porcentaje de blanqueamiento y distancia a la costa

En cuanto a variables locales, se observa que los registros más altos de blanqueamiento promedio se agrupan en la categoría de distancia a la costa de 1–10 km, mientras que los sitios más abiertos (>10 km) presentan valores menores. Esto apunta a que zonas meso-costeras, donde la renovación de agua podría ser menor que mar abierto pero mayor que ultra-cercana a costa, podrían estar más vulnerables.

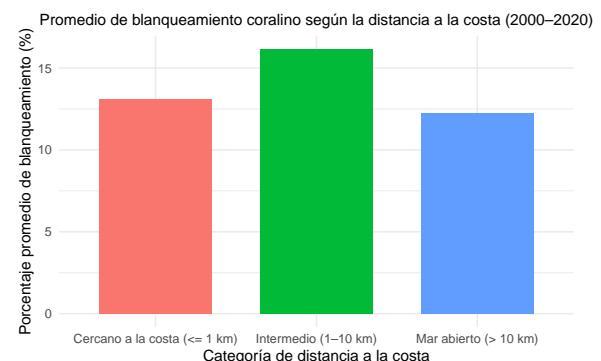


Figura 3: Promedio de blanqueamiento coralino según la distancia a la costa (2000–2020)

La exposición mayoritaria de los sitios muestreados a “exposed” (~54 %) también plan-

tea la necesidad de analizar cómo el oleaje, la radiación y la mezcla influyen en el fenómeno.

Distribución de registros por tipo de exposición (2000–2020)

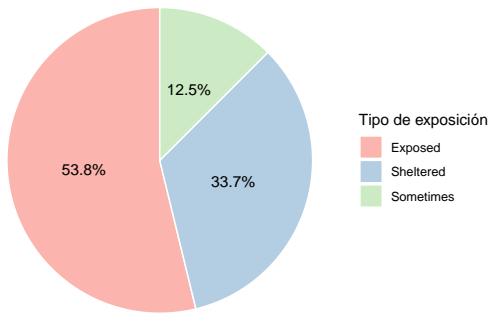


Figura 4: Distribución de registros por tipo de exposición (2000–2020)

Temperatura y anomalías térmicas en relación con el blanqueamiento coralino

Desde la perspectiva de los factores ambientales, la relación entre anomalías térmicas máximas (SSTA) y porcentaje promedio de blanqueamiento es positiva, aunque con considerable dispersión. Esto indica que si bien la SSTA es un predictor crítico, por sí sola no explica completamente la severidad del blanqueamiento.

Relación entre la temperatura promedio y el blanqueamiento coralino (2000–2020)

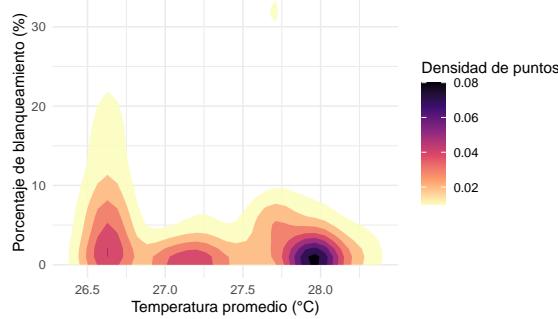


Figura 5: Relación entre la temperatura promedio y el blanqueamiento coralino (2000–2020)

La exploración del mapa de calor de temperatura media vs blanqueamiento confirma que

la temperatura promedio no es suficiente como indicador: la historia térmica, el estrés acumulado y otros moduladores son esenciales.

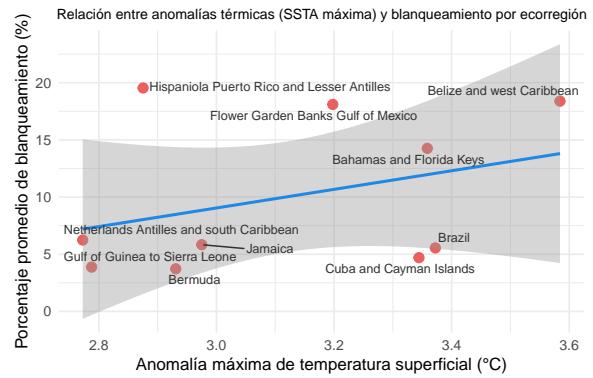


Figura 6: Relación entre anomalías térmicas (SSTA máxima) y blanqueamiento por ecorregión

Evaluación del modelo

El desempeño del modelo se evaluó mediante dos métricas:

- el error cuadrático medio raíz (RMSE), que mide la magnitud promedio del error de predicción; y
- el coeficiente de determinación (R^2), que expresa la proporción de variabilidad explicada por el modelo.

Los resultados mostraron que el Random Forest reprodujo adecuadamente los valores bajos y medios de blanqueamiento, aunque subestimó los niveles superiores al 40–50 %, lo que sugiere la influencia de factores no incluidos en esta configuración inicial.

La construcción del modelo se fundamentó en los lineamientos metodológicos de Breiman (2001), sobre bosques aleatorios; Wright y Ziegler (2017), quienes desarrollaron la implementación de la librería ranger; y Kuhn y Johnson (2013), respecto al uso de modelos predictivos aplicados.

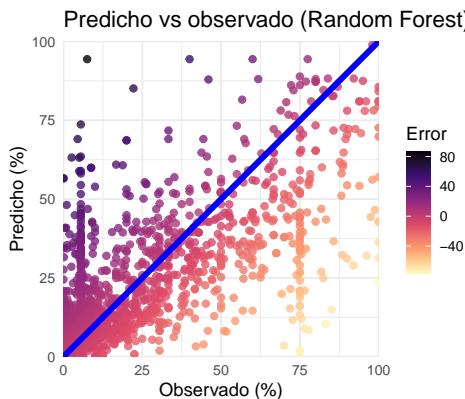


Figura 7: Modelo predictivo Random Forest sobre valores de blanqueamiento

En términos de interpretación, la anomalía térmica máxima (SSTA) y el año mostraron las mayores contribuciones al modelo, confirmando que el estrés térmico y la variabilidad interanual son los principales determinantes del blanqueamiento. Sin embargo, la magnitud del error en los valores más elevados indica que sería conveniente incorporar variables complementarias, como el índice de acumulación de calor (Degree Heating Weeks, DHW), la profundidad del arrecife, la turbidez, la exposición al oleaje o la cobertura coralina y macroalgal, que podrían capturar mejor la respuesta ecológica ante eventos extremos.

Conclusiones

El blanqueamiento coralino en el Atlántico presenta una marcada variabilidad temporal, con picos significativos en 2005 y 2014–2015 asociados a eventos de estrés térmico extremo. Esto confirma que las anomalías de temperatura son uno de los principales detonantes del blanqueamiento masivo. La distribución espacial del fenómeno no es homogénea.

Las ecorregiones del Caribe central-occidental, especialmente las Antillas y Belice-Caribe occidental, registran los valores más ele-

vados de blanqueamiento. Estas áreas muestran una alta vulnerabilidad estructural y térmica en comparación con regiones como Brasil o África occidental.

Factores locales como la distancia a la costa y la exposición al oleaje se correlacionan con la severidad del blanqueamiento. Los sitios localizados entre 1 y 10 km de la costa presentan mayor afectación, lo que sugiere que las condiciones meso-costeras pueden amplificar el estrés térmico o limitar la capacidad de recuperación.

La anomalía térmica máxima (SSTA) se confirma como el predictor ambiental más influyente, aunque la dispersión observada demuestra que el blanqueamiento es un fenómeno multifactorial afectado por la interacción entre variables oceanográficas, ecológicas y espaciales.

El modelo Random Forest tuvo un desempeño aceptable, reproduciendo bien los valores bajos y medios de blanqueamiento. Sin embargo, su tendencia a subestimar los eventos severos indica que variables adicionales —como historial térmico acumulado, radiación, estratificación o presencia de olas de calor marinas— podrían mejorar la capacidad predictiva.

Recomendaciones

Integrar modelos predictivos multivariados en programas de gestión, aprovechando el potencial de herramientas como Random Forest para generar alertas tempranas basadas en condiciones ambientales en tiempo real.

Promover estrategias de conservación enfocadas en la mitigación del estrés térmico, como la protección de áreas refugio, la restauración de poblaciones con mayor tolerancia térmica y la reducción de presiones locales (contaminación, sedimentación, prácticas pesqueras).

Referencias

- Baker, A. C., Glynn, P. W., & Riegl, B. (2008). Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 80(4), 435–471. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.09.003>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Donner, S. D., Rickbeil, G. J. M., & Heron, S. F. (2017). A new, high-resolution global mass coral bleaching database. *Nature Climate Change*, 7(11), 839–844. <https://doi.org/10.1038/nclimate3377>
- Eakin, C. M., Sweatman, H. P. A., & Brainard, R. E. (2019). The 2014–2017 global-scale coral bleaching event: Insights and impacts. *Science*, 365(6459), 977–981. <https://doi.org/10.1126/science.aaw9832>
- Glynn, P. W. (1993). Coral reef bleaching: Ecological perspectives. *Coral Reefs*, 12(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/BF00303779>
- Hoegh-Guldberg, O. (1999). Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research*, 50(8), 839–866. <https://doi.org/10.1071/MF99078>
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Álvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J. G., Anderson, K. D., Baird, A. H., & Wilson, S. K. (2018). Global warming transforms coral reef assemblages. *Nature*, 556(7702), 492–496. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0041-2>
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). *Applied predictive modeling*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>
- McClanahan, T. R., Darling, E. S., Maina, J. M., Muthiga, N. A., D'agata, S., Leblond, J., & Weil, E. (2020). Coral community response to climate disturbances. *Marine Ecology Progress Series*, 635, 1–16. <https://doi.org/10.3354/meps13207>
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*, 29(2), 215–233. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00009-9)
- Muscatine, L., & Porter, J. W. (1977). Reef corals: Mutualistic symbioses adapted to nutrient-poor environments. *BioScience*, 27(7), 454–460. <https://doi.org/10.2307/1297526>
- Safaie, A., Silbiger, N. J., McClanahan, T. R., Pawlak, G., Barshis, D. J., Hench, J. L., Rogers, J. S., Williams, G. J., & Davis, K. A. (2018). High frequency temperature variability reduces the risk of coral bleaching. *Nature Communications*, 9(1), 1671. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04074-2>
- Spalding, M. D., Ravilious, C., & Green, E. P. (2001). *World Atlas of Coral Reefs*. University of California Press.
- van Woesik, R., & Burkepile, D. (2022). Bleaching and environmental data for global coral reef sites from 1980–2020. Biological and Chemical Oceanography Data Management Office (BCO-DMO). (Version 2). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01121-y>
- Veron, J. E. N., Devantier, L. M., Turak, E., Green, A. L., Kininmonth, S., Stafford-Smith, M., & Peterson, N. (2013). Marine Ecoregions of the World: A bioregionalization of coastal and shelf areas. *Science*,

295(5558), 1280–1284. <https://doi.org/10.1126/science.1064774>

Wright, M. N., & Ziegler, A. (2017). ranger: A fast implementation of random forests for high dimensional data in C++ and R. *Journal of Statistical Software*, 77(1), 1–17. <https://doi.org/10.18637/jss.v077.i01>