

Impacto del Huracán María en Arecibo, Puerto Rico

Nathalie G. Rivera-Torres¹, Yidiana Zayas-Rivera²

Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez, P.O. Box 9000 Mayagüez, P.R 00681-9000.

Departamento de Física¹, nathalie.rivera8@upr.edu

Departamento de Física², yidiana.zayas@upr.edu

Resumen:

El huracán María tocó tierra el 20 de septiembre de 2017 en el sureste de Puerto Rico; específicamente en Yabucoa, y se trasladó a lo largo de toda la Cordillera Central hasta salir por Arecibo. En el momento de su llegada era un potente huracán categoría 4 con vientos sostenidos de 155 millas por hora. Toda la isla experimentó fuertes vientos y lluvias, lo cual trajo consigo una gran devastación en muchos aspectos. Por tal razón, el propósito de esta investigación fue analizar cuán significativos serían los efectos luego del impacto directo de un huracán de gran magnitud. La zona de estudio fue el área costera de Arecibo donde se analizó la densidad en vegetación, las estructuras, los efectos de la marejada ciclónica y el nivel de sedimentos suspendidos al océano. Mediante el conocimiento adquirido sobre la Percepción Remota, se utilizaron los programas ArcMap 10.5 y ENVI 5.4 (64-bit) para procesar fotografías aéreas tomadas por FEMA el 23 de septiembre de 2017 y se compararon con fotografías aéreas del 2010. Se pudo concluir que los daños y cambios fueron evidentes. La densidad en vegetación en el área del río descendió un 0.0483 del promedio según el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Además, la disminución de la vegetación se apreció en la imagen infrarroja y en las clasificaciones supervisadas. La mayoría de las estructuras sufrieron daños a causa de las inundaciones y vientos. Por otro lado, utilizando la herramienta *Measure* se obtuvo una diferencia en la longitud de la desembocadura del Río Grande de Arecibo de 140.3 m debido a su crecimiento, lo que causó a su vez, que la costa tuviera una disminución en longitud de 24.2 m. El gran número de pulgadas de lluvia no solo provocó un crecimiento en la desembocadura del río, sino que trajo consigo un aumento en la cantidad de sedimentos suspendidos que abarcaron una gran porción de la costa.

Palabras clave: Huracán María, Arecibo, fotografía aérea, vegetación, estructuras, marejada ciclónica, sedimentos, ENVI 5.4 (64-bit), ArcMap 10.5

1. Introducción

La temporada de huracanes en el Atlántico de 2017 fue una temporada extremadamente activa. Inició oficialmente el 1 de junio y finalizó el 30 de noviembre de 2017. En un año promedio se ven doce tormentas tropicales con nombre, donde seis pasan a ser huracanes. Tres de esos huracanes alcanzan la categoría tres en la Escala Saffir-Simpson. Sin embargo, este año hubo diecisiete tormentas con nombre, diez de las cuales se fortalecieron en huracanes y seis de las cuales llegaron a la categoría tres o más fuertes. Esta temporada fue la más intensa desde la temporada de 2005 en términos de la Energía Ciclónica Acumulada y la segunda donde dos huracanes categoría 5 tocaron tierra; Irma en Barbuda y María en Dominica. Definitivamente una de las temporadas más costosas a causa de los daños y que marcó una nueva historia. En la Figura 1 se observa un resumen de las trayectorias que tomaron los fenómenos atmosféricos de la temporada.

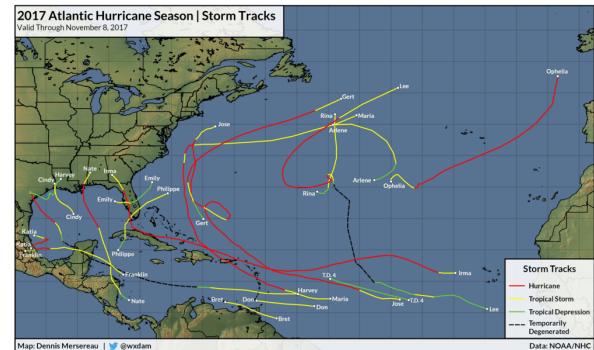


Figura 1: Resumen de la temporada de huracanes en el Atlántico del 2017
(Crédito: www.popsci.com)

A pesar de la gran cantidad de actividad de fenómenos, este proyecto se centró en el huracán que afectó directamente a Puerto Rico, el cual fue el huracán María. Entró por Yabucoa; la costa sureste, el 20 de septiembre de 2017 a las 6:15 am y salió por el Barrio Islote, entre Arecibo y Barceloneta a horas del mediodía. En el momento de su llegada era un potente huracán categoría 4 con vientos sostenidos de 155 millas por hora y una presión central mínima de 917 milibares. Toda la isla experimentó fuertes vientos y lluvias, lo cual trajo consigo una gran devastación a la naturaleza y estructuras. Además, los servicios básicos; como electricidad y distribución de agua potable, colapsaron dejando a miles de personas sin los servicios, ni comunicaciones.



Imagen 1. Puerto Rico antes y después de María. (Crédito: www.abc.net.au)

Según la NOAA, es comparable a un tornado de tamaño mediano que pasa por un país entero/ Sin embargo, la principal diferencia radica en que generalmente los tornados no vienen con una gran cantidad de lluvia. La precipitación es uno de los efectos más peligrosos del huracán ya que causa deslizamientos de terreno y ríos fuera de su cauce. Algunas partes de Puerto Rico vieron más de 30 pulgadas de lluvia, cantidad de lluvia extrema que convierte las pequeñas corrientes en catastróficas inundaciones. En la Figura 2 e Imagen 2 se puede observar la trayectoria por Puerto Rico y una imagen satelital respectivamente.



Figura 2. La trayectoria del huracán María a través de Puerto Rico. (Crédito: www.vox.com)

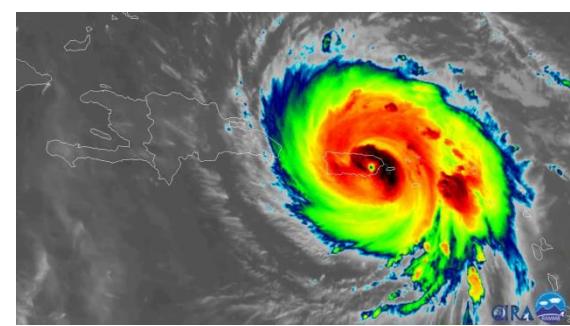


Imagen 2. Imagen Satelital Infrarroja del Huracán María entrando a Puerto Rico. (Crédito: NOAA)

Muchas personas no habían experimentado una experiencia como esa, ya que Puerto Rico hace más de 80 años que no recibía un impacto tan directo y de tal magnitud, así que este huracán será muy recordado por todos y como estudiantes de Meteorología se debe tener un gran compromiso con la sociedad de educar para eventos futuros.

2. Objetivos

El objetivo principal del trabajo fue identificar cambios en la vegetación antes y después del Huracán María en la zona costera de Arecibo. Al estudiar la costa se esperan cambios en la densidad de la vegetación como consecuencia directa de los vientos. Además, la marejada ciclónica que se define como un aumento de varios metros del nivel del mar pudo haber provocado inundaciones que afectarían no solo la vegetación sino también en estructuras cercanas por lo que también se estudiaron los efectos en las estructuras de la zona. Finalmente se buscaba investigar los niveles de sedimentación en el océano tras la precipitación de aproximadamente 40 pulgadas de lluvia.

3. Metodología

Al realizar el trabajo de investigación el primer paso que se tomó en cuenta fue la selección de zona de estudio. Considerando la trayectoria del Huracán María y que se tenía como objetivo principal estudiar el comportamiento de los cuerpos de agua y

sus efectos en las zonas aledañas se estudió el pueblo de Arecibo, donde se podía encontrar la desembocadura de un río, estructuras cercanas a cuerpos de agua y además se pudiese estudiar el índice de vegetación antes y después del paso del huracán.



Imagen 3. Zona geográfica de estudio.

Una vez se determinó la zona geográfica de estudio entonces se buscaron las imágenes antes y después de María. Se utilizó ArcMap 10.5 para identificar el código de las fotografías aéreas y se descargaron. Las fotografías aéreas georreferenciadas utilizadas fueron adquiridas por FEMA durante los días de 22 y 23 de septiembre de 2017. Para estudiar la zona geográfica antes del huracán se emplearon fotografías aéreas del 2010 con una resolución espacial de 15cm.

Las fotografías se procesaron en ENVI 5.4 (64-bit). El primer paso consistió en la realización de una corrección atmosférica utilizando la herramienta *Dark Subtraction* (DOS). Utilizando Data Manager se cargaron las bandas para obtener una imagen “True Color” y otra “False Color”

Utilizando el método *ISODATA* se realizó una clasificación no supervisada, mientras se utilizó *Maximum Likelihood Classification* para la clasificación supervisada. Para dicha clasificación se seleccionaron regiones de interés para identificar las clases deseadas a estudiar.

Posterior a esto, se midió el índice de vegetación *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) para la imagen del río, utilizando la herramienta disponible en ENVI 5.4.

Además, utilizando la herramienta *Measure* se midieron los cambios en la distancia desembocadura del río y en la costa.

Finalmente, se compararon los resultados, detectando y analizando los patrones de cambio en la vegetación, estructuras, sedimentación y otras características luego del paso del huracán.

4. Resultados y análisis

4.1 Río Grande de Arecibo

4.1.1 Imagen a Color Verdadero



Imagen 4. Río Grande de Arecibo 2010 en color verdadero.



Imagen 5. Río Grande de Arecibo 2017 en color verdadero.

En la Imagen 4 e Imagen 5 se pueden observar ambas imágenes, antes (2010) y después del huracán (23 de septiembre de 2017) en color verdadero con las bandas roja, azul y verde. Luego de la corrección atmosférica se mostró esencialmente un aumento en la sedimentación depositada al océano de la desembocadura del río y el gran crecimiento que obtuvo el río, ya que como mencionado anteriormente, la isla recibió una gran cantidad de lluvia en menos de 24 horas. Además, se apreció claramente la disminución en densidad de la vegetación dejando bastante terreno al descubierto.

4.1.2 Imagen a Color Falso



Imagen 6. Río Grande de Arecibo 2010 infrarrojo.



Imagen 7. Río Grande de Arecibo 2017 infrarrojo.

En la Imagen 6 y 7 se observaron las mismas imágenes, pero esta vez con las bandas infrarroja, verde y azul. La vegetación saludable tiene un máximo de reflectancia en la zona infrarroja del espectro, así que en estas imágenes se pudo visualizar la reducción de la vegetación a partir del cambio en intensidad con la que están reflejando. También los patrones, textura y el contraste entre la vegetación y los cuerpos de agua son más claros.

4.1.3 Clasificación Supervisada *Maximum Likelihood*

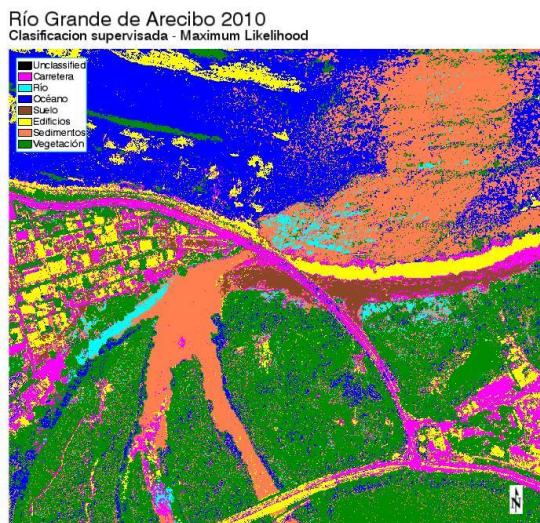


Imagen 8. Río Grande de Arecibo 2010
Clasificación Supervisada

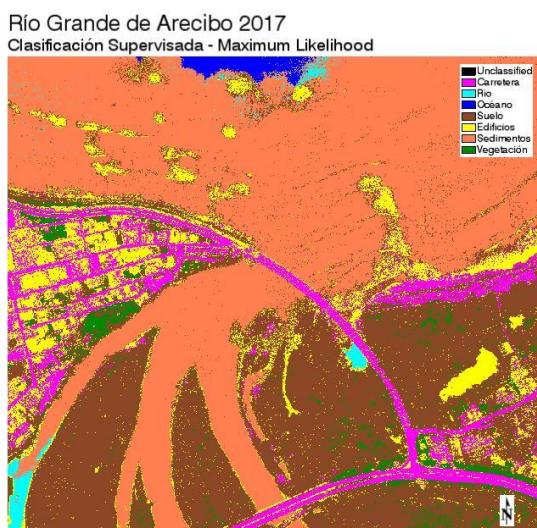


Imagen 9. Río Grande de Arecibo 2017
Clasificación Supervisada

En las imágenes 8 y 9 se pueden apreciar los resultados obtenidos para el caso de las clasificaciones supervisadas utilizando el proceso de *Maximum Likelihood Classification* de las cuales se tomaron como regiones de interés el río,

carreteras, océano, suelo, edificios, sedimentos y vegetación. Este proceso se hizo para asignar clases conocidas a pixeles desconocidos. Los errores en la clasificación se atribuyen al training de las muestras. Gracias a la clasificación los cambios más notables fueron en la cantidad de vegetación. Luego del huracán todo el suelo quedó al descubierto. De igual forma es visiblemente notable el aumento en los sedimentos depositados luego del huracán y el área del océano que abarcan.

4.1.4 Clasificación No-Supervisada con el método IsoData

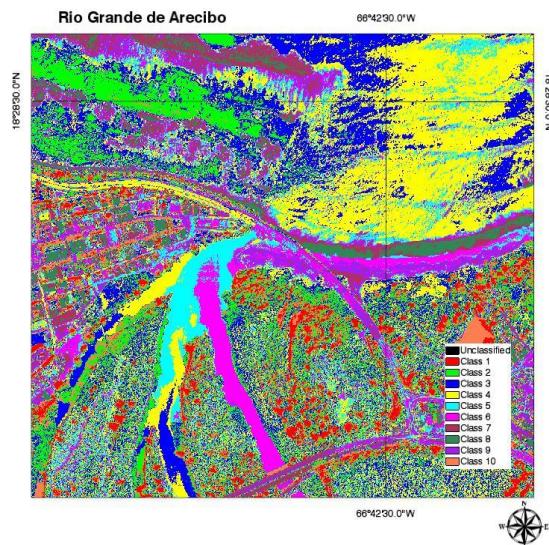
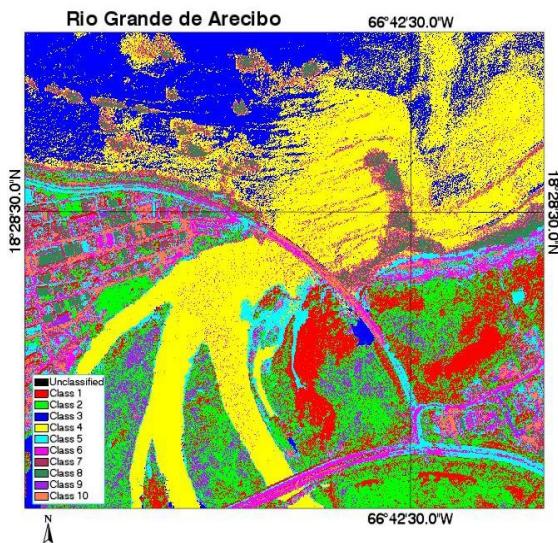


Imagen 10. Río grande de Arecibo 2010
Clasificación no supervisada



*Imagen 11. Río grande de Arecibo 2017
Clasificación no supervisada*

Las clasificaciones no supervisadas se realizaron con el algoritmo IsoData y La clasificación no supervisada se utilizaron para definir grupos naturales basado en la data multiespectral. Esto nos muestra que la imagen está compuesta de clases espectrales uniformes. En la Imagen 10 en el área del agua del río se pueden observar distintas clases, ya que al parecer había llovido previamente y había regiones con agua clara como también una pequeña cantidad de sedimentos y demás sustancias que reconoce la clasificación. Sin embargo, en la Imagen 11 luego del huracán, en el área del río se puede

observar una clasificación más homogénea, ya que la cantidad de sedimentos era tanta que lo reconoce como una sola clase.

4.1.5 Índice de vegetación - Normalized Difference Vegetation Index

Difference Vegetation Index

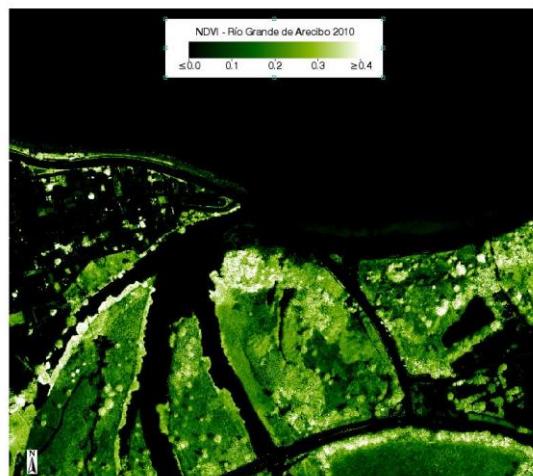


Imagen 12. NDVI antes (2010)

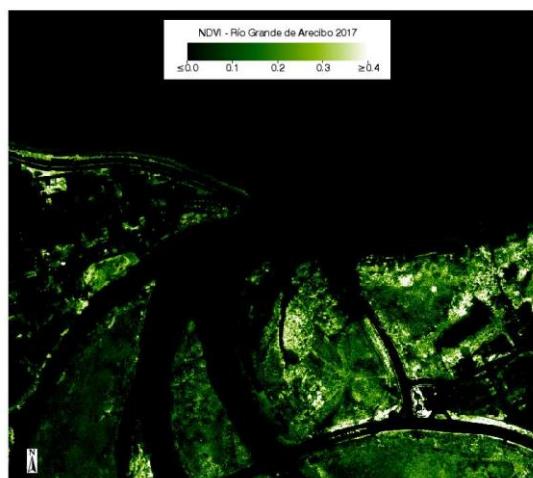


Imagen 13. NDVI después (23/sept/2017)

En el caso del índice de vegetación se utilizó NDVI que utiliza las banda infrarroja cercana y roja con la siguiente

ecuación: $NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}$. Donde hay mayor densidad de vegetación es en la región que se muestra de un color más claro a blanco y los colores más oscuros representan poca vegetación. Se obtuvo un promedio de 0.080 en la imagen del antes y un 0.032 en la imagen luego de María, calculando así una diferencia de 0.048 en densidad de vegetación.

4.1.6 Desembocadura del Río Grande de Arecibo

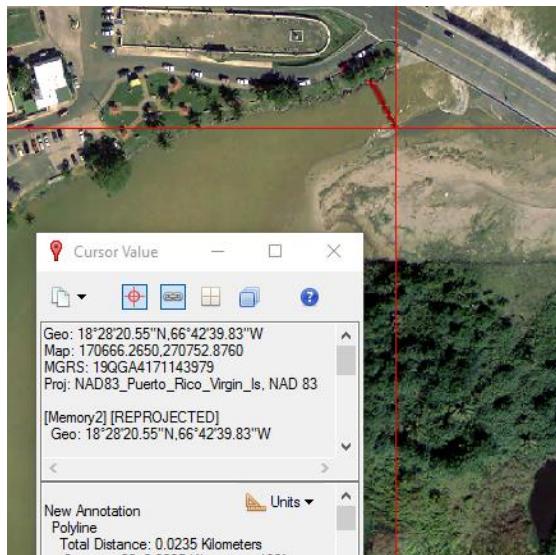


Imagen 14. Medida antes

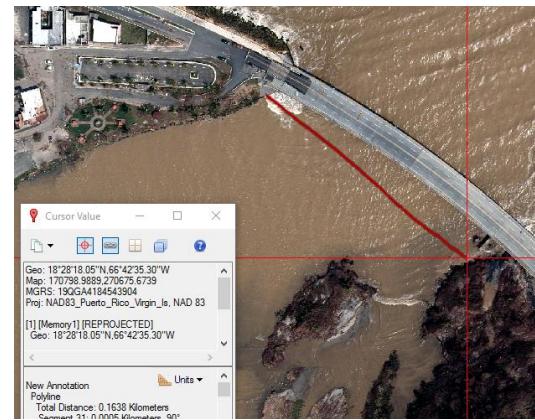


Imagen 15. Medida después

La Imagen 14 e Imagen 15, muestran más cerca los cambios que sufrió la desembocadura del Río Grande de Arecibo. Se utilizó la herramienta *Measure* para medir la distancia entre dos puntos del borde del río. En la fotografía aérea del 2010 la distancia entre estos fue de 23.5m mientras la distancia posterior al huracán fue de 163.8m. A partir de esto se puede concluir que hubo una diferencia significativa de 140.3m en la desembocadura del río. Esto es importante, ya que como se observa en la imagen el río invadió una región que no acostumbrada y el mismo efecto se observó en demás localizaciones de Puerto Rico, causando pérdidas significativas. Debe ser siempre

considerado en desarrollo de diversos proyectos y edificaciones.

4.2 Costa de Arecibo

4.2.1 Imagen a Color Verdadero



Imagen 16. Costa 2010



Imagen 17. Costa 23/sept/2017

La otra zona de estudio fue el área de la costa, la cual podemos observar en las imágenes 16 y 17 en color verdadero. Se puede observar claramente la gran área hasta donde se extienden los sedimentos suspendidos. Además, la división y el aumento en descarga de las aguas de la Ciénaga Tiburones de Arecibo que también tiene un aumento en su descarga, ya que toda esa área se sobre saturó creando una gran inundación en el área afectando zonas urbanas.

4.2.2 Imagen a Color Falso

Costa y Faro de Arecibo 2010 - Infrarrojo



Imagen 18. Costa 2010 infrarrojo



Imagen 19. Costa 23/sept/2017 infrarrojo

En la Imagen 18 y 19, se cargó de igual manera la banda infrarroja, verde y azul y los resultados fueron parecidos al área del río. Es notable la diferencia en la intensidad con la cual la vegetación está reflejando en el infrarrojo, indicativo de la pérdida de la misma.

4.2.3 Clasificación Supervisada Maximum Likelihood

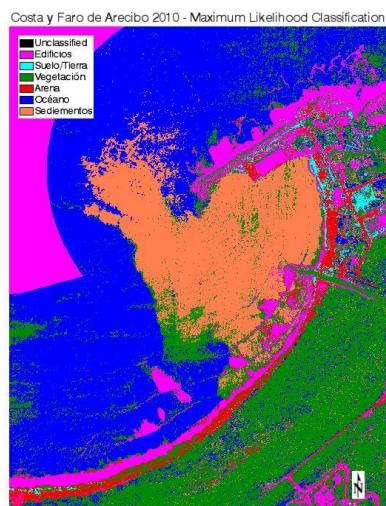


Imagen 20. Costa clasificada supervisadamente 2010.

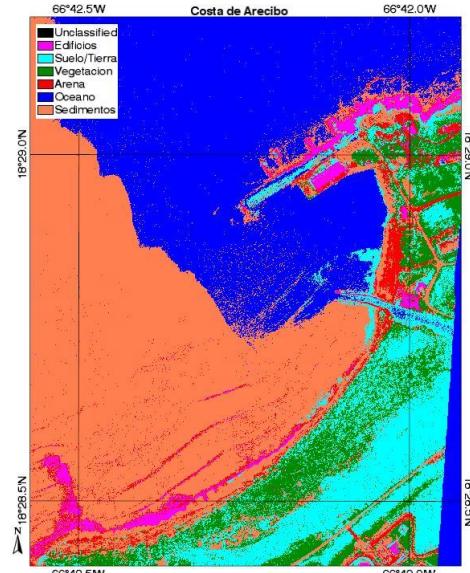


Imagen 21. Costa clasificada supervisadamente 23/sept/2017

4.2.4 Clasificación No-Supervisada con el método IsoData

Costa y Faro de Arecibo 2010 - IsoData

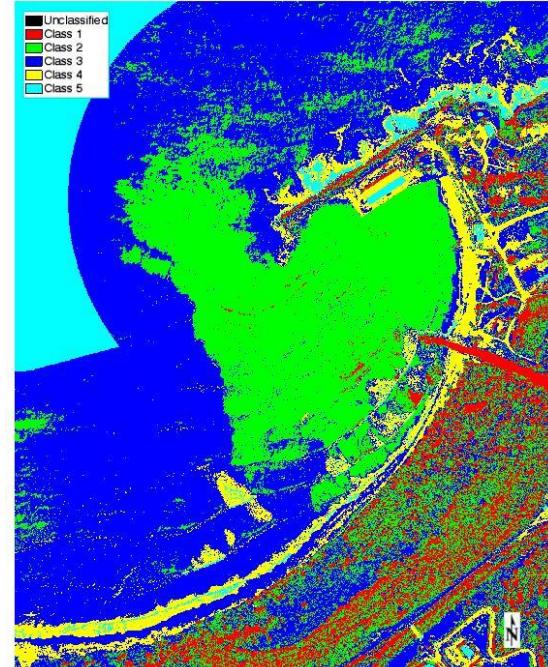


Imagen 22. Costa clasificación no supervisada 2010

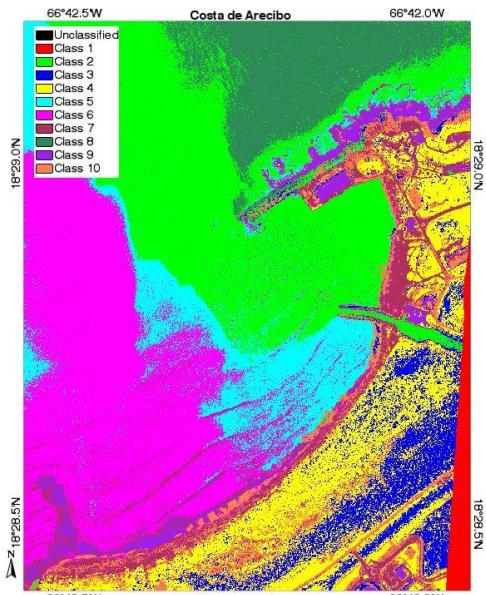


Imagen 23. Costa clasificación no supervisada 23/sept/2017

En la zona de la costa; para la clasificación supervisada también con el método *Maximum Likelihood*, se seleccionaron las siguientes clases para clasificar: edificios, suelo/tierra, vegetación, arena, océano y sedimentos. Se notó que los sedimentos en la imagen del 2010 no se extendían una gran área y solo se ven los de la Ciénaga, mientras que en las del 2017 abarcan una gran área desde la desembocadura hasta la costa, pero no clasificó los otros sedimentos de la descarga del pantano. Algunos errores se atribuyen al training de las muestras. Por otro lado, el área donde clasificaba vegetación fue prácticamente sustituido por terreno libre.

En la clasificación no supervisada, nuevamente con el algoritmo IsoData, se notó la diferencia entre los componentes de sedimentos suspendidos en el océano. En la del 2010, se encuentra la descarga del pantano, pero en la del 2017 clasificó hasta donde llegan los sedimentos del río, los de la ciénaga y la unión entre estos. Pasó de tener un área pequeña de sedimentos a ser un área con sedimentos completamente.

El área que contenía vegetación se apreciaba con muchos colores antes porque había varias clases, pero en la imagen después del huracán fue prácticamente una clase, suelo libre.

4.2.5 Línea de la Costa de Arecibo



Imagen 24. Medidas de costa

En la Imagen 24 se puede observar una proyección de las dos líneas de costa sobre la imagen del 23 de septiembre de

2017. Se utilizó como referencia la vegetación para medir la costa antes y después del huracán María con la herramienta de ENVI 5.4 *Measure*. Se obtuvo que antes del huracán la costa tenía una longitud de 1,199.5 m y después 1,175.3 m. Se calculó una diferencia de 24.2 m, que en las imágenes se observa que fue debido a que el crecimiento del río invadió parte de la costa con su descarga al océano y la marejada ciclónica.

4.3 Ciudad de Arecibo

4.3.1 Imagen a Color Verdadero

Estructuras de Arecibo 2010 - True Color



Imagen 25. Estructuras Arecibo 2010

Estructuras de Arecibo 2017 - True Color



Imagen 26. Estructuras Arecibo
23/sept/ 2017

4.3.2 Imagen a Color Falso

Estructuras de Arecibo 2010 - Infrarrojo



Imagen 27. Estructuras Arecibo 2010
infrarrojo

Estructuras de Arecibo 2017 - Infrarrojo



Imagen 28. Estructuras Arecibo 2017 infrarrojo

La última zona de estudio fue donde hubo una mayor concentración de estructuras de la zona. Al igual que en los casos anteriores en la imagen 25 y 26 se pudo apreciar los colores verdaderos que mediante una comparación visual permite ver la diferencia en vegetación y hasta donde se extendieron los sedimentos. En las imágenes 27 y 28 se encuentran las infrarrojas, que nos percibió que entre las estructuras hay un poco de reflectancia a causa de presencia de sedimentos y particulado en las calles. Eso sucedió debido a la inundación que sufrió el área. En la imagen 42 más adelante se apreciará con más detalle los sedimentos.

4.3.3 Clasificación Supervisada

Maximum Likelihood

Estructuras de Arecibo 2010

Clasificación supervisada - Maximum Likelihood



Imagen 29. Estructuras 2010 clasificación supervisada

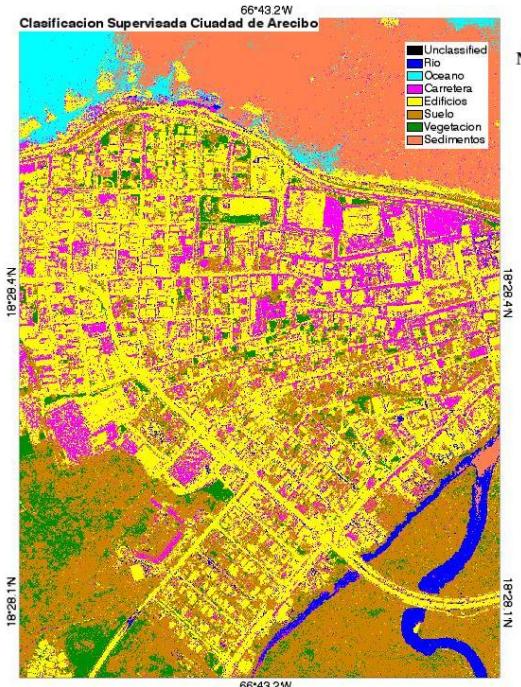


Imagen 30. Estructuras 2017 clasificación supervisada

4.3.4 Clasificación No-Supervisada con el método IsoData



Imagen 31. Estructuras 2010 clasificación no supervisada.

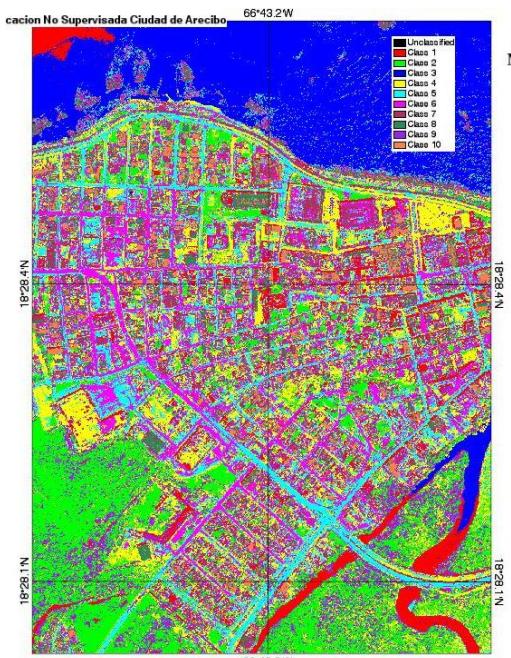


Imagen 32. Estructuras 2017 clasificación no supervisada.

Por último, se utilizó el mismo método de las dos zonas anteriores para la clasificación supervisada y las clases a clasificar fueron: río, océano, carreteras, edificios, suelo, vegetación y sedimentos. Se vio que clasificó olas como ciudad, pero es algo un poco complicado de remendar. Sin embargo, esto no afectaba el estudio, ya que el objetivo era estudiar la ciudad y sedimentos. En la Imagen 29 e Imagen 30, se vio claramente la perdida de vegetación entre medio de las estructuras que antes quizás no era tan evidente desde lejos. También los sedimentos suspendidos al océano no se extendían hasta esa área, pero luego del huracán sí. En la Imagen 31 y 32 la clasificación del océano y vegetación se ven más homogéneas porque todo es suelo libre y sedimentos, mientras en la de antes había diferentes clases de vegetación y el océano tenía mucha actividad de oleaje.

4.4 Zonas de Interés

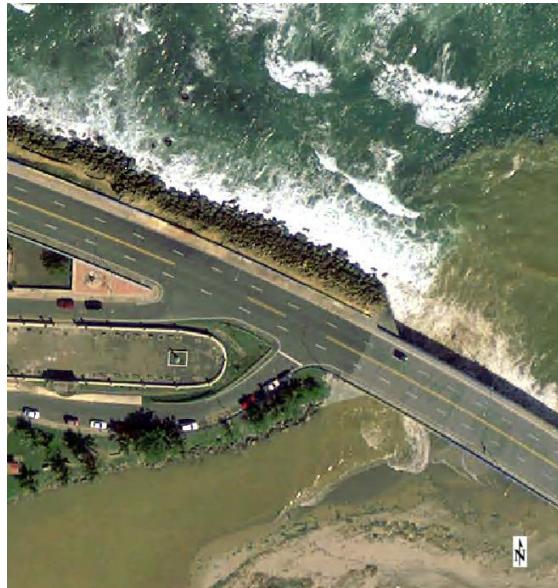


Imagen 33. Puente antes del huracán



Imagen 35. Estructuras antes del huracán

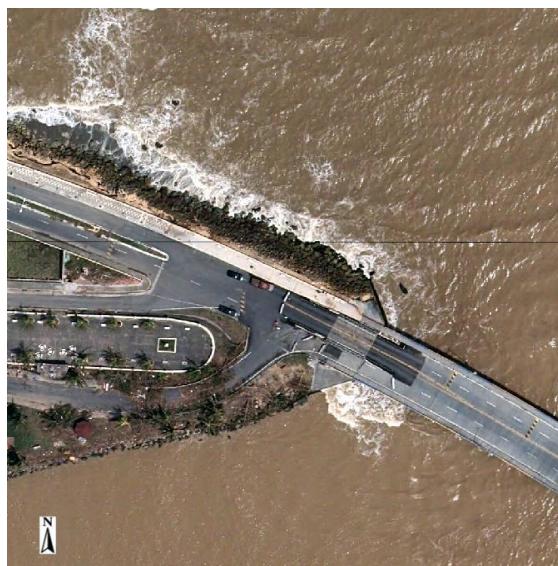


Imagen 34. Puente después del huracán



Imagen 36. Estructuras después del
huracán

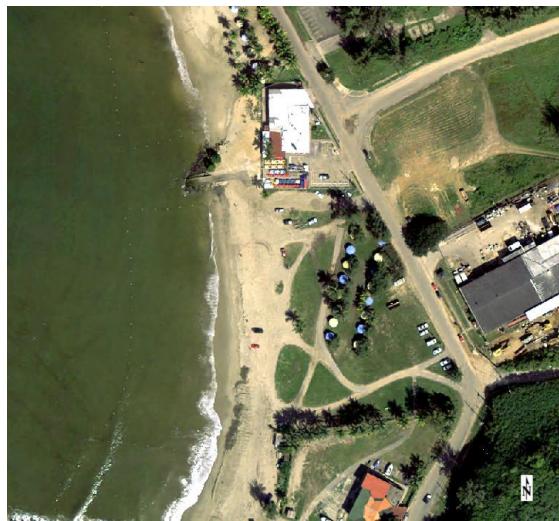


Imagen 37. Costa antes del huracán



Imagen 39. Faro antes del huracán

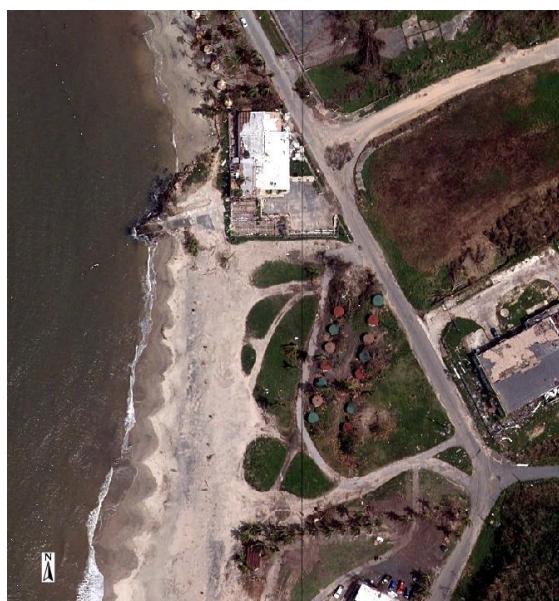


Imagen 38. Costa después del huracán



Imagen 40. Faro después del huracán



Imagen 41. Estructuras antes del huracán



Imagen 42. Estructuras después del huracán

Se adjudicaron imágenes sobre distintas zonas de interés pertenecientes a la región estudiada para visualizar los efectos en una escala menor. Con las imágenes se pudo apoyar la conclusión del impacto del huracán mayormente en las edificaciones, que no fue evidente en el procesamiento de las imágenes.

5. Conclusiones

Tras el estudio del impacto del Huracán María en Arecibo se pudieron cumplir con los objetivos y predicciones sobre el comportamiento esperado. Se logró determinar una disminución en la densidad de la vegetación, cambios en la longitud de las costas y expansión de la desembocadura de los ríos y finalmente sedimentos depositados en el cuerpo de agua oceánica por el número de precipitaciones.

6. Recomendaciones

Entre las recomendaciones para trabajos de investigación posteriores o continuación del mismo se recomienda estudiar la misma región geográfica en un periodo de siete años para estudiar futuros cambios y proceso de recuperación, incluyendo tanto naturales como inducidas por el ser humano. También poder obtener una medida cuantitativa de los sedimentos para poder hacer comparaciones y validar los datos al igual que la vegetación. Además, se podría extender los parámetros

de estudios a otras regiones de la isla como método de comparación para cuantificar los daños y comparar los resultados con el comportamiento esperado tras el paso del huracán. De igual manera se esperaría determinar el índice de vegetación NDVI para la zona de la ciudad y la costa y examinar el efecto de los sedimentos depositados en la medida del índice de vegetación.

7. Referencias

Bianchette, T.A., Liu, K.B., LAM, N.S., and KIAGE, L.M., 2009. Ecological Impacts of Hurricane Ivan on the Gulf Coast of Alabama.

Barras, J.A., Brock, J.C., Morton, R.A., and Travers, L.J. 2009. Remotely Sensed Imagery Revealing the Effects of Hurricanes Gustav and Ike on Coastal Louisiana.

Rodriguez-Ramos, M.I., Irizarry-Ramírez, M., 2016. Impacto del Huracán Katrina en Louisiana, utilizando imágenes del programa Landsat (TM y ETH+) y MODIS