

Aplicación de la Tecnología Geoespacial para Determinar el Déficit de Precipitación en la Zona Cafetalera de Puerto Rico

*Gabriel Saldaña Diaz
Maestría en Ciencia y Tecnología Geoespacial
Prof. Víctor M. Romero González
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y Agrimensura
Universidad Politécnica Puerto Rico*

Resumen — *El propósito de este estudio es estimar el déficit de precipitación para el cultivo del café en el área cafetalera de Puerto Rico. Ilustrando mapas de déficit de precipitación cada dos décadas en el mes de agosto, durante los años 2000 al 2099. El Déficit de Precipitación ($DP=P-ET_c$) se calculo a través de algebra de mapas. Utilizando rasters creados de 26 estaciones de datos de precipitación y temperatura. Los datos provienen del Modelo Circular Global (MCG), (CGCM3.1 – T47) producido por Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada en el escenario (a1b). Los resultados de este análisis demostraron que el área cafetalera en Puerto Rico tendrá un aumento en el déficit de precipitación para el cultivo del café de hasta un máximo -108 (mm). Este estudio provee información útil para enfocar esfuerzos futuros a corto y largo plazo en el manejo del agua en la caficultura puertorriqueña.*

Palabras claves — *Álgebra de Mapas, Análisis Espacial, Cultivo de Café, Déficit Precipitación, Evapotranspiración, Raster Calculation.*

INTRODUCCIÓN

En años recientes se ha planteado que ocurrirá un aumento en la temperatura a nivel mundial, esto a consecuencia del aumento en la atmosfera de gases que crean el efecto de invernadero. Un aumento en la temperatura provocaría efectos en el ciclo hidrológico, lo que requerirá de ajustes en la manera en que manejamos la necesidad de agua en los cultivos. La zona cafetalera de Puerto Rico se encuentra ubicada en el centro y oeste de la isla. La zona es dominada por topografía montañosa, lo que produce precipitación orográfica, la cual es

moderada por la topografía, temperatura y humedad.

Los factores de mayor peso en el ciclo hidrológico lo son la precipitación lo cual se refiere a cualquier producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la Tierra y la evapotranspiración, lo cual se refiere a la combinación del agua que se evapora de la superficie de la tierra con la energía solar y el agua que las plantas transpiran al utilizar el agua para regular su temperatura.

En el estudio estimamos evapotranspiración y precipitación, enfatizando el cambio de temperatura atmosférica pronosticado cada dos décadas en 26 estaciones meteorológicas a través de la isla. Los datos de precipitación y temperatura utilizados, son producto de la reducción a escala regional del Modelo de Circulación Global (CGCM3.1 – T47). Para analizar el déficit de precipitación (DP) que ocurrirá en el futuro en la zona cafetalera de Puerto Rico entre los años 2000 al 2099.

Existen otros estudios que utilizan datos de (MCG) reducidos a escala regional para calcular déficit de precipitación en Puerto Rico [1] Harmsen, E.W, et al. En su estudio Harmsen determino cambios temporales del déficit de precipitación utilizando el (MCG) DOE/NCAR PCM y observo que para el mes de febrero ocurriría déficit de precipitación y en septiembre excesos de precipitación para las estaciones de Adjuntas, Mayagüez y Lajas.

Con este estudio se desea pronosticar patrones del ciclo hidrológico futuro en la zona cafetalera. Además, se busca facilitar la comprensión de datos de déficit de precipitación mediante el uso de mapas. La metodología descrita aquí sirve para

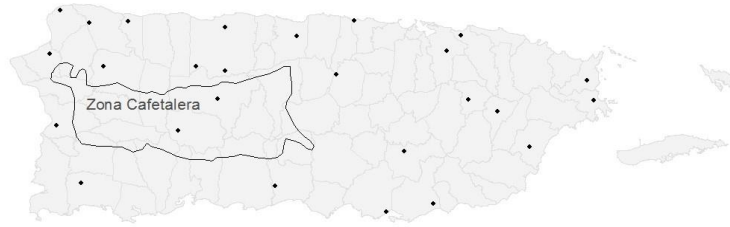


Figura 1
Zona Cafetalera en Puerto Rico y las 26 Estaciones Meteorológicas Evaluadas en el Estudio

ilustrar otros escenarios de cambio climático y potenciales efectos en otros cultivos.

METODOLOGÍA

Se analizaron cambios de temperatura diaria promedio, precipitación mensual promedio, evapotranspiración mensual promedio y déficit de precipitación mensual promedio en las estaciones de Adjuntas y Utuado durante el periodo de 1961 al 2099, por intervalos de 20 años. Para establecer la tendencia y razón de cambio de estas variables climatológicas en la región de la zona cafetalera.

Además, se calculó el (DP) para el mes de agosto durante el periodo de 2000 al 2099, por intervalos de 20 años. Se analizó la razón de cambio de (DP) para las 26 estaciones alrededor de la isla y se produjo un raster de los resultados por cada periodo, el cual se cortó para ilustrar solo la zona cafetalera.

Datos Meteorológicos

El estudio se basa en pronósticos de Modelos de Circulación Global (MCG) que pronostican cambios atmosféricos a nivel mundial. Se obtuvieron datos de pronóstico diario de precipitación y temperatura para el periodo de 1961 al 2099, del trabajo de [2] Hayhoe et al. En este estudio Hayhoe presentan datos de precipitación, temperatura máxima y mínima diaria para 26 estaciones meteorológicas en Puerto Rico durante el año 1961 al 2099. El estudio de Hayhoe se basa en la reducción estadística de escala de distintos (MCG). La reducción estadística de escala se creó utilizando el método Statistical Asíncronos Regional Regression Model (ARRM) descrito en

Stoner et al. [3]. Esta técnica se desarrolló para satisfacer la brecha entre los productos a gran escala de los modelos de circulación general de la atmósfera-océano (AOGCMs) y la producción en escala fina requerida para las evaluaciones de impacto climático local y regional. El (MCG) que se escogió para producir este estudio fue el (GCM3.1 –T47) y el escenario (a1b).

Variables Meteorológicas

Se utilizó la fórmula de Hargraves-Samani para calcular la Evapotranspiración de referencia, ya que esta fórmula enfatiza el cambio principalmente en la variable de temperatura y la radiación solar [4] Hargraves et al.

$$ET_{(o)} = 0.0023 \times Ra \times TD^{0.5} (TC^{\circ} + 17.8) \quad (1)$$

En donde $ET_{(o)}$ es evapotranspiración de referencia con unidades (mm dia^{-1}), Ra es radiación solar con unidades ($\text{MJ/m}^2\text{-day}$). La radiación solar está determinada por la latitud y el mes del año. La Tabla 2 muestra los valores de radiación solar de acuerdo a latitud y al mes del año [5]. TD es la diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria en $^{\circ}\text{C}$. TC es la temperatura media diaria en $^{\circ}\text{C}$.

Para calcular evapotranspiración del cultivo $ET_{(c)}$ se multiplica la evapotranspiración de referencia $ET_{(o)}$ por el coeficiente del cultivo del café $K_{(c)}$. El coeficiente del cultivo de café para una plantación establecida donde se permite el crecimiento de malezas es de 1.10 [6].

$$ET_{(c)} = ET_{(o)} \times K_{(c)} \quad (2)$$

Tabla 2
Radiación Solar (MJ/m²-day⁻¹) por Latitud y Fecha

Mes	Latitud (grados decimal N)						
	17.9	18	18.1	18.2	18.3	18.4	18.5
Enero	27.9	27.9	27.8	27.7	27.7	27.6	27.6
Febrero	31.4	31.3	31.3	31.2	31.2	31.1	31.1
Marzo	35.3	35.3	35.3	35.3	35.2	35.2	35.2
Abril	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0
Mayo	39.0	39.0	39.0	39.1	39.1	39.1	39.1
Junio	39.1	39.1	39.1	39.1	39.2	39.2	39.2
Julio	38.9	38.9	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0
Agosto	38.3	38.3	38.3	38.3	38.3	38.3	38.3
Septiembre	36.4	36.4	36.4	36.3	36.3	36.3	36.3
Octubre	32.9	32.9	32.8	32.8	32.8	32.7	32.7
Noviembre	29.1	29.1	29.0	29.0	28.9	28.9	28.8
Diciembre	26.9	26.8	26.8	26.7	26.7	26.6	26.6

Para estimar el déficit de precipitación en la zona cafetalera de Puerto Rico se escogió analizar el mes de agosto ya que alrededor de este mes los granos de café están terminando de formarse y la falta de irrigación produce reducción en los rendimientos de la cosecha [7] Flores. Se calculó el promedio mensual acumulativo por intervalos de 20 años para evapotranspiración de cultivo $ET_{(c)}$ y precipitación en las 26 estaciones meteorológicas alrededor de Puerto Rico, en una hoja de cálculo.

Se interpolaron las 26 estaciones meteorológicas para el promedio mensual de agosto. En la plataforma de arctoolbox del programa ArcGis utilizando la herramienta Spatial Analyst. El tipo de interpolación que se utilizó fue Spline Interpolation, con la cual se consiguió obtener datos de evapotranspiración y temperatura por toda la isla en un formato tipo raster, minimizando la curvatura y los cambios abruptos en los datos alrededor de las estaciones.

El déficit de precipitación se calculó restando la evapotranspiración promedio acumulativa mensual para el mes de agosto de la precipitación promedio acumulativa mensual para el mes de agosto. Utilizando la plataforma de arctoolbox del programa ArcGis y su herramienta Spatial Analyst, Map Algebra, Raster Calculation. El resultado produjo, datos de (DP) déficit de precipitación para toda la isla en formato raster.

$$DP = P - ET_{(c)} \quad (3)$$

Nos interesa enfatizar los resultados de (DP) en el área de estudio, la zona cafetalera de Puerto Rico. El área de estudio es extraído de la imagen producida en Ecos del Café por Monroi et al. [8]. Aquí Monroi delimita lo que se conoce como la zona cafetalera. La imagen se georeferenció al sistema de coordenadas WGS84 y se formó un polígono en formato shapefile. Con el shapefile de zona cafetalera se cortaron los rasters del déficit de precipitación promedio mensual acumulativo de agosto, utilizando la herramienta de Data Management, Clip.

RESULTADOS

Los datos de temperatura promedio diaria para las estaciones meteorológicas de Adjuntas y Utuado ilustrados en la Figura 2. Reflejan un aumento en la temperatura promedio diaria. Con una tendencia de 0.155 y 0.1296 respectivamente. Además del año 1961 al 2099 la razón de cambio en temperatura promedio mensual en Adjuntas aumentará 12.87°C y la temperatura promedio mensual en Utuado aumentará 10.76°C. Un aumento mensual promedio de 0.08°C por año.

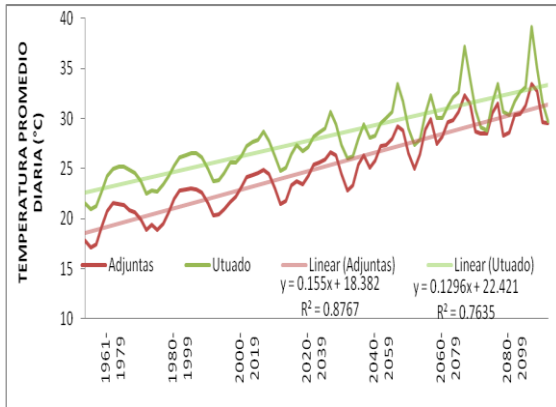


Figura 2
Temperatura Diaria °C Durante el Periodo de 1961 al 2099,
Promedio por Intervalos de 20 años en la Estación
Meteorológica de Adjuntas y Utuado

Los datos de precipitación promedio mensual para las estaciones meteorológicas de Adjuntas y Utuado ilustrados en la Figura 3. Reflejan una disminución en la precipitación promedio mensual. Con una tendencia de -0.510 y -0.514 respectivamente. Además del año 1961 al 2099 la razón de cambio en la precipitación promedio mensual en Adjuntas disminuirá -42.34 mm y la precipitación en Utuado disminuirá -42.69 mm. Una disminución de la precipitación promedio mensual de 0.30 mm por año.

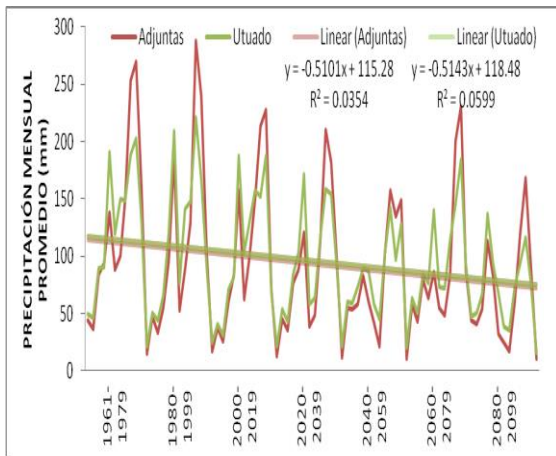


Figura 3
Precipitación Mensual (mm) Durante el Periodo de 1961 al
2099, Promedio por Intervalos de 20 años en la Estación
Meteorológica de Adjuntas y Utuado

Los datos de evapotranspiración promedio mensual para las estaciones meteorológicas de Adjuntas y Utuado ilustrados en la Figura 4. Refleja

una disminución en la evapotranspiración promedio mensual en la estación de Adjuntas. Con una tendencia de -0.187 y una disminución en la razón de cambio de -15.51 mm/mes desde el año 1961 al 2099. La estación de Utuado refleja un aumento en la evapotranspiración promedio mensual. Con una tendencia de 0.168 y un aumento en la razón de cambio de 13.99 mm/mes desde el año 1961 al 2099.

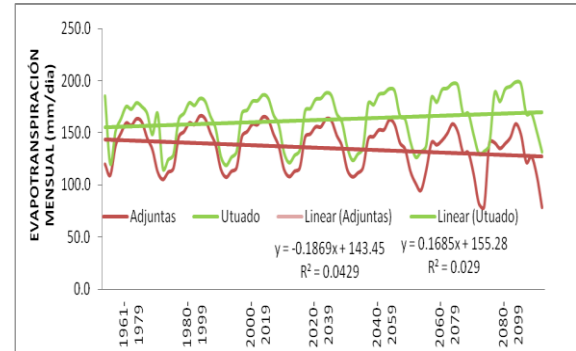


Figura 4
Evapotranspiración Mensual (mm/día) Durante el Periodo
de 1961 al 2099, Promedio por Intervalos de 20 años en la
Estación Meteorológica de Adjuntas y Utuado

Déficit de Precipitación

El déficit de precipitación se estimó mediante la resta de la evapotranspiración del cultivo mensual acumulada sobre la precipitación mensual acumulada, promedios por intervalos de 20 años. Los valores positivos representan un exceso de precipitación y los valores negativos representan el déficit de precipitación para satisfacer las necesidades de cultivo de café. Los datos de déficit precipitación mensual promedio para las estaciones meteorológicas de Adjuntas y Utuado ilustrados en la Figura 5, reflejan una disminución en el déficit de precipitación mensual promedio. Con una tendencia de -0.474 y -0.869 respectivamente. Además del año 1961 al 2099 la razón de cambio del déficit de precipitación mensual promedio en Adjuntas disminuirá -82.82 mm y la razón de cambio del déficit de precipitación en Utuado disminuirá -138.96 mm. Una disminución en el déficit de precipitación mensual promedio de -10.89 mm por año.

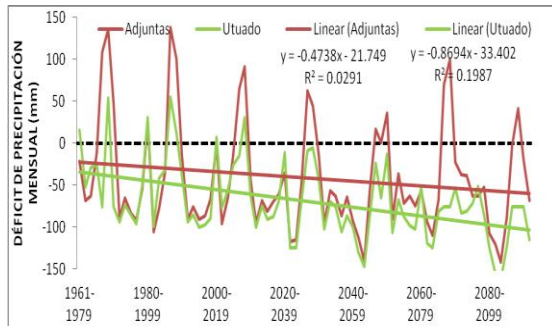


Figura 5

Déficit Precipitación Mensual (mm) Durante el Periodo de 1961 al 2099, Promedio por Intervalos de 20 años en la Estación Meteorológica de Adjuntas y Utuado

Los valores de déficit de precipitación acumulado para el mes de agosto en todas las estaciones meteorológicas de Puerto Rico durante el periodo de 2000 al 2099, por intervalos de 20 años se ilustran en la Tabla 5 y la Figura 6. Cabe destacar que la estación de Quebradillas solo se calculo para el periodo de 2000-2019 por falta de datos para los periodos subsiguientes.

Al graficar las estaciones meteorológicas en promedio las estaciones reflejan un aumento en la razón de cambio del déficit de precipitación de promedio mensual de 69.3 mm/mes y una tendencia de -13.9 desde el año 2000 al 2099. Solo las

estaciones de Arecibo 3 ESE PR US, Cayey 1 E PR US, Quebradillas PR US y Borinquén Airport PR US reportaron unos valores positivos de tendencia, de estas ninguna se encuentra dentro de la zona cafetalera. En las estaciones dentro de la zona cafetalera, Adjuntas aumenta en la razón de cambio de un 84.8 mm/mes y Utuado 104.6 mm/mes su déficit de precipitación en el mes de agosto por el periodo de 2000 al 2019 y sus tendencia -16.9 y -20.8 respectivamente.

En general observamos en la tabla 3 el porcentaje de cambio ocurrido por periodo. Muestra como los valores promedio de las 26 estaciones aumento en todos los periodos, con excepción del periodo de 2040-2059 al periodo de 2060-2079.

Al interpolar y cortar los resultados de los estimados del déficit de precipitación acumulado para el mes de agosto en la zona cafetalera. Observamos la variabilidad que existe con respecto a la región. El área oeste sobrellevará un déficit de precipitación menor que el área este de la región. Además, al observar la media de déficit de precipitación en el área cafetalera ilustrado en la Tabla 4, notamos el aumento progresivo a través de los periodos, alcanzando la media máxima el periodo de 2080-2099.

Tabla 3

Porcentaje de Cambio en Déficit de Precipitación Promedio Acumulado en el Mes de Agosto para los Intervalos de 20 Años en las 26 Estaciones Meteorológicas

Periodo	2000/2019	2020/2039	2040/2059	2060/2079	2080/2099
Cambio %					
Promedio (DP)	57%	16%	-5%	34%	

Tabla 4

Media de Cambio en Déficit de Precipitación (mm) Promedio Acumulado en el Mes de Agosto para los Intervalos de 20 Años en el Área Cafetalera de Puerto Rico

Periodo	2000-2019	2020-2039	2040-2059	2060-2079	2080-2099
Media					
Déficit Precipitación	-17.49	-59.45	-74.03	-71.49	-108.21

Tabla 5
Déficit de Precipitación Promedio (mm) Acumulado en el Mes de Agosto para las 26 Estaciones Meteorológicas

Estación Meteorologica	2000-2019	2020-2039	2040-2059	2060-2079	2080-2099
ADJUNTAS SUBSTATION PR US	-12.6	-48.0	-56.0	-66.6	-88.1
AGUIRRE PR US	-57.7	-81.1	-111.4	-111.1	-121.7
ARECIBO 3 ESE PR US	-90.0	-87.0	-78.9	-72.6	-87.0
ARECIBO OBSERVATORY PR US	9.6	-33.3	-28.5	-5.1	-53.3
CAYEY 1 E PR US	-32.9	-53.2	-69.6	-68.0	-93.2
COLOSO PR US	44.5	-15.5	-18.1	17.8	-45.0
COROZAL SUBSTATION PR US	-36.3	-64.2	-87.3	-93.1	-126.4
DORADO 2 WNW PR US	-25.9	-54.5	-74.2	-78.5	-115.7
DOS BOCAS PR US	-19.2	-66.5	-86.4	-85.7	-123.8
FAJARDO PR US	-31.5	-59.6	-67.9	-79.0	-106.8
GUAYAMA 2 E PR US	-22.2	-45.2	-82.6	-90.2	-105.6
GURABO SUBSTATION PR US	6.8	-33.7	-41.7	-52.3	-103.3
HUMACAO 2 SSE PR US	20.3	-19.3	-23.4	-30.3	-80.3
ISABELA SUBSTATION PR US	-27.5	-61.3	-75.0	-60.3	-89.6
JUNCOS 1 SE PR US	-14.4	-50.9	-61.4	-74.1	-106.8
LAJAS SUBSTATION PR US	-83.2	-105.6	-127.2	-119.2	-133.8
MANATI 2 E PR US	-58.9	-76.7	-68.8	-70.1	-95.3
MAYAGUEZ CITY PR US	30.3	-25.0	-23.9	14.2	-39.2
PONCE 4 E PR US	-92.7	-108.2	-140.3	-144.7	-155.4
QUEBRADILLAS PR US	-60.0	n/a	n/a	n/a	n/a
RIO PIEDRAS EXPERIMENTAL	-14.0	-48.5	-66.1	-66.9	-107.1
SAN SEBASTIAN 2 WNW PR US	30.5	-30.7	-40.2	-15.5	-81.3
UTUADO PR US	-25.3	-68.4	-87.1	-81.1	-123.1
BORINQUEN AIRPORT PR US	-57.1	-85.0	-48.2	-35.6	-60.0
ROOSEVELT ROADS PR US	-25.7	-50.7	-62.4	-74.1	-99.0
SAN JUAN L M MARIN INTERNATIONAL	-23.9	-46.6	-71.2	-77.9	-107.4

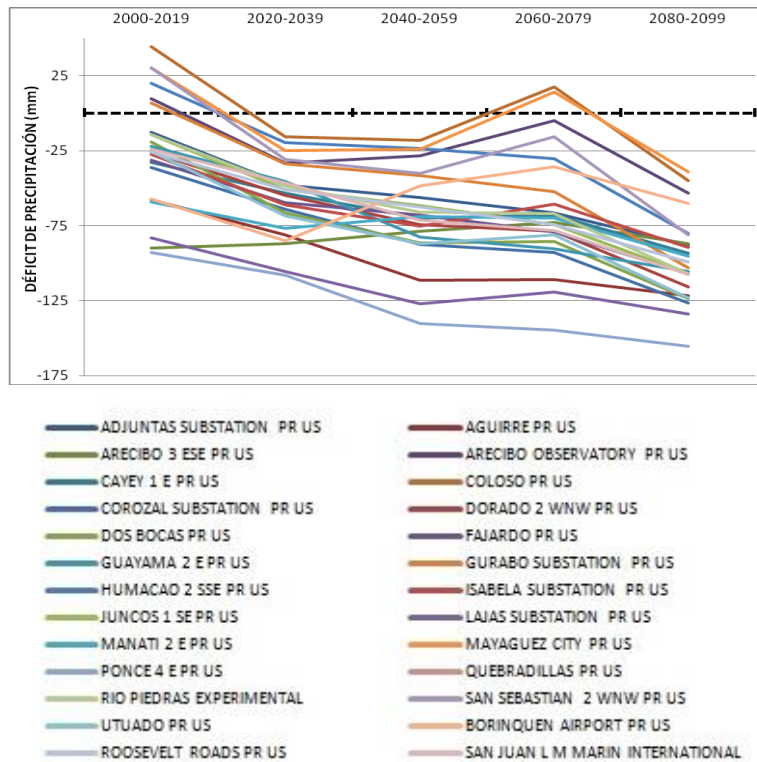


Figura 6
Déficit de Precipitación para el Mes de Agosto en las 26 Estaciones Meteorológicas a través del Siglo 21

Déficit de Precipitación 2000-2019

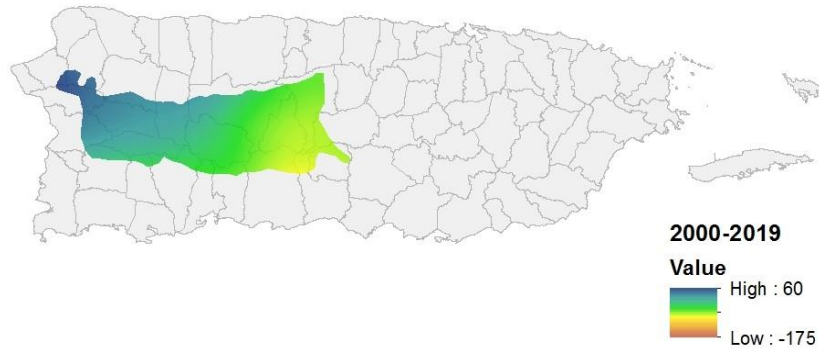


Figura 7
Interpolación de Déficit de Precipitación para el Mes de Agosto Durante el Periodo 2000-2019

Déficit de Precipitación 2020-2039



Figura 8
Interpolación de Déficit de Precipitación para el Mes de Agosto Durante el Periodo 2020-2039

Déficit de Precipitación 2040-2059



Figura 9
Interpolación de Déficit de Precipitación para el Mes de Agosto Durante el Periodo 2040-2059

Déficit de Precipitación 2060-2079



Figura 10
Interpolación de Déficit de Precipitación para el Mes de Agosto Durante el Periodo 2060-2079

Déficit de Precipitación 2080-2099



Figura 11
Interpolación de Déficit de Precipitación para el Mes de Agosto Durante el Periodo 2080-2099

CONCLUSIÓN

Con este estudio estimamos el déficit de precipitación en la zona cafetalera de Puerto Rico. Considerando 26 estaciones meteorológicas alrededor de la isla, utilizando el pronóstico del modelo de circulación global (GCM3.1 –T47) en el escenario a1b reducidos estadísticamente de escala por el método (ARRM). El análisis hidrológico se enfocó en el mes de agosto en el periodo de 2000-2099. Los resultados de este análisis demostraron como el aumento de la temperatura provocara aumentos en la evapotranspiración. Consecutivamente una reducción en la precipitación causaría mayor déficit de

precipitación incrementando a través de los años. Para contrarrestar los efectos de la evapotranspiración, las plantas requerirán de un volumen mayor de agua. El pronóstico evaluado a es este estudio indica, que la precipitación no lograra satisfacer las necesidades del cultivo del café en el área cafetalera de Puerto Rico.

Estos hallazgos tienen implicaciones importantes en manejo de agua agrícola y en la preparación de siembras nuevas en la zona. Deberíamos considerar el riego para el café en la montaña y el uso de variedades resistentes a sequia, en el desarrollo de siembras nuevas para afrontar cambios hidrológicos en el futuro.

Limitaciones del Estudio

Se debe puntualizar que los datos de temperatura y precipitación utilizados en este estudio fueron obtenidos de un solo Modelo de Circulación Global. El modelo propuesto por el Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, el modelo (CGCM3.1 – T47) y el escenario de este modelo (.a1b), este considera una generación de gases de invernadero de rango mediana. Para pronosticar cambios climatológicos regionales se recomienda que se utilicen varios de estos modelos. Dado a que existe discrepancias entre estos.

REFERENCIAS

- [1] E. W. Harmsen, *et al.*, “Seasonal climate change impact on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico”, *Agricultural Water Management*, Vol. No. 96, 2009, pp. 1085-1095.
- [2] K. Hayhoe, *et al.*, “Quantifying Key Drivers of Climate Variability and Change for Puerto Rico and the Caribbean”, *Texas Tech University*, Appendix A, 2013.
- [3] A. K. Stoner, *et al.*, “An asynchronous regional regression model for statistical downscaling of daily climate variables”, *International Journal of Climatology*, Vol. No. 33, 2012, pp. 2473–2494. DOI: 10.1002/joc.3603.
- [4] G. H. Hargreaves, *et al.*, "Reference Crop Evapotranspiration from Temperature", *American Society of Agricultural Engineers*, No. 85~251, 1985.
- [5] E. W. Harmsen, *et al.*, “Estimating Evapotranspiration in Puerto Rico”, *Journal of Agriculture, University of Puerto Rico*, Vol.86 No.1, 2002, pp.35-54.
- [6] R. G. Allen, *et al.*, “Evapotranspiración del Cultivo”, *FAO Irrigación y drenaje*, Vol. No. 56, 1998, pp.112.
- [7] C. A. Flores, *et al.*, “Ciclo fenológico de Café”, *Estación Experimental Agrícola Recinto Universitario de Mayagüez*, 2014, pp. 42.
- [8] M. F. Monroig. (2007-2009). Ecos del Café. Mapa Zona Cafetalera PR. Puerto Rico [Online]. Disponible: <http://academic.uprm.edu/mmonroig/>.