

# ANÁLISIS DE LOS PATRONES DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN DIFERENTES ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DEL CANAL DE PANAMÁ.

BERTALÍA VILLAR URIBE.

Licenciada en Estadística

&

RAMÓN C. GUERRA UMANZOR.

Licenciado en Estadística

Asesores: José del C. Ochoa (Universidad de Panamá - Esc. de Estadística)

Steven R. Paton (Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales)

## RESUMEN

Como a lo largo y ancho del canal están situadas alrededor de 26 estaciones meteorológicas, las cuales difieren no sólo en su ambiente local sino también en su latitud y longitud, utilizamos varios métodos de agrupación jerárquica con el fin de obtener grupos o zonas donde las estaciones tienen patrones de precipitación similar. De los métodos utilizados con el denominado *average*, obtuvimos cinco zonas o grupos.

De las zonas formadas escogimos las estaciones con mayor número de registros anuales, para continuar con el estudio de la tendencia a largo plazo donde utilizamos el modelo de regresión lineal y el procedimiento de Lowes. Con los resultados de la regresión lineal aceptamos la hipótesis de que las tendencias generales a disminuir de la precipitación observadas por el Dr. Windsor no han cambiado.

Sobre el efecto del fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) en la precipitación hemos obtenido que según la magnitud con que se presente el ENOS, éste causa una reducción en la precipitación pluvial anual para la zona ubicada en el centro del Istmo (zona D, representada por las estaciones de Gamboa y Alhajuela). Además, al utilizar los datos diarios de Barro Colorado, encontramos que el ENOS tiene un efecto de reducción sobre la precipitación en la estación lluviosa en Barro Colorado. Por el contrario, para la estación seca no hay un efecto significativo.

## INTRODUCCIÓN

En la República de Panamá se ha construido una de las más grandes hazañas realizadas por el hombre: el Canal de Panamá, el cual ha contribuido grandemente al progreso de las naciones a nivel mundial; y representa indudablemente un aporte económico muy significativo para el país.

Su Cuenca hidrográfica es de gran importancia ya que es allí donde se recoge y almacena el agua, el recurso más importante para el Canal. La capacidad de embalse de los lagos Gatún y Alhajuela hace posible la continua y eficiente navegación a través del Canal de Panamá (Alvarado, 1985). Además, garantiza el abastecimiento de agua potable para las ciudades de Panamá (aproximadamente 492 millones de litros de agua potable que se distribuye desde la planta de Chilibre; IDDAN 1995) y Colón, así como la generación de energía eléctrica.

Este hecho nos ha motivado a realizar el presente trabajo y además por las publicaciones realizadas por el Dr. Windsor (Investigador del Instituto Smithsonian) y colaboradores en 1985 y 1990 referente al comportamiento de la precipitación pluvial que indicaban una tendencia a disminuir a lo largo de la Cuenca del Canal y a través de América Central.

Sin embargo, los registros tomados después de esas investigaciones muestran que la tendencia puede estar cambiando hacia un aumento de la precipitación anual. (S. Paton, 1995, Comunicación Personal).

Además, la tendencia de la precipitación, ya sea de aumentar o de disminuir, puede estar afectada por factores variables como el clima de Panamá, la ocurrencia del fenómeno ENOS y la deforestación en el ecosistema de la Cuenca del Canal. Todas estas observaciones serán analizadas en este trabajo.

En base a estas observaciones, realizamos esta investigación con el objetivo de determinar el comportamiento espacial y temporal de la precipitación pluvial en diferentes estaciones pluviométricas a lo largo del Canal e investigar si el ENOS afecta la precipitación pluvial en esta zona.

**Procedencia y Naturaleza de los Datos.**

Los datos que se han utilizado fueron obtenidos en su mayoría a través del Departamento de Meteorología e Hidrología de la Comisión del Canal (Sr. Jorge Espinosa) y por Steven Paton del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI). Además, algunos datos, como el Índice de la Oscilación del Sur, fueron obtenidos de varias fuentes a través de la red de computadoras conocida como INTERNET.

Los registros pluviométricos corresponden a 26 estaciones meteorológicas situadas a lo largo del Canal de Panamá, desde las costas del Pacífico hasta las del Atlántico. En algunas estaciones meteorológicas los

registros datan hacia finales del siglo XIX, en la época en que los franceses iniciaron la construcción del Canal (Alhajueta, Balboa Heights, Gamboa y Salamanca).

**Agrupación de las Estaciones Meteorológicas.**

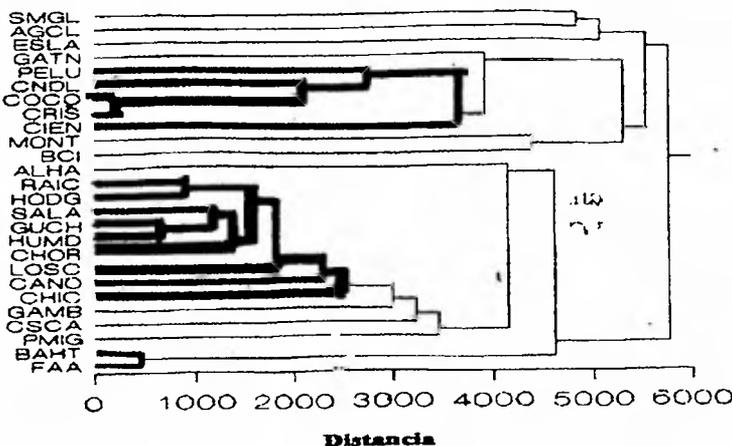
Como a lo largo y ancho del Canal están situadas alrededor de 26 estaciones meteorológicas las cuales difieren no sólo en su ambiente local sino también en su latitud y longitud, podríamos considerar que también se pueden dar diferencias en los patrones de precipitación; y si existiesen tales diferencias, podríamos suponer que se pueden dar grupos de estaciones con precipitación similar.

Aplicando los procedimientos del análisis del "cluster" obtuvimos que para el método centroid hemos identificado tres zonas en donde las estaciones presentan una precipitación anual similar. Para el método single linkage se identificaron tres zonas en donde las estaciones meteorológicas también presentan una precipitación anual similar. Sin embargo, este método introduce en los grupos, estaciones que no habían sido incluidas por el método centroid.

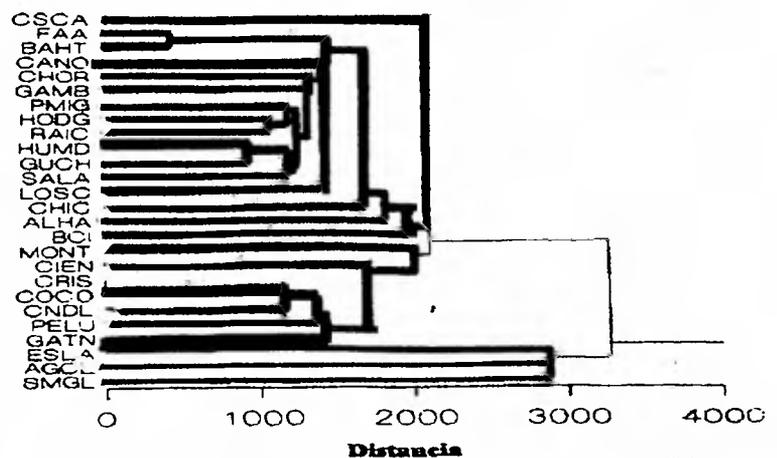
A diferencia de los métodos anteriores, el método average presenta cuatro grupos o zonas, los cuales están representados en el dendograma por los colores rojo (grupo A), verde (grupo B), amarillo (grupo C) y azul (grupo D). Sin embargo, en el grupo representado

GRÁFICA#1

Dendograma del Método Centroid



Dendograma del Método Single Linkage

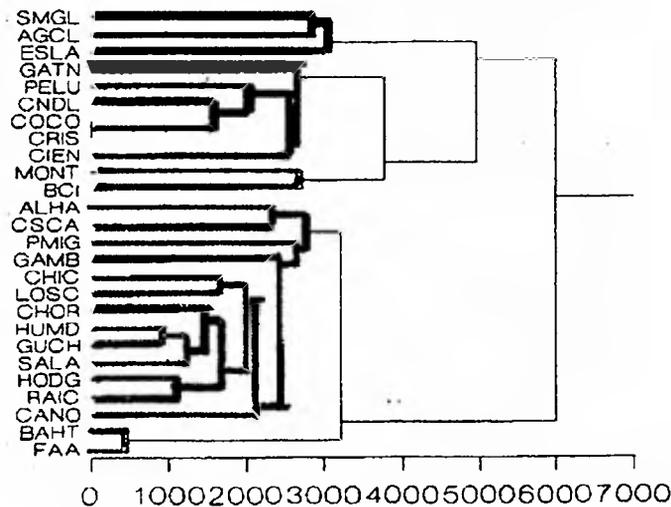


por el color azul tomaremos a las estaciones de FAA y BAHT como un grupo aparte, representado por el color púrpura (grupo E), debido a que estas dos estaciones también se mantienen unidas en los métodos

anteriores. Por lo tanto, de acuerdo con este método, tenemos cinco grupos o zonas en donde las estaciones meteorológicas presentan una precipitación pluvial anual similar. Véase la siguiente gráfica:

GRÁFICA # 3

Dendograma del Método Average



Como los tres métodos de agrupación presentan grupos o zonas donde las estaciones meteorológicas registran una precipitación anual similar entre sí y que difieren con respecto a otras zonas, podemos indicar que existe evidencia de la diferencia que hay en la precipitación pluvial anual entre las estaciones y, además, que existen zonas donde las estaciones presentan una precipitación anual similar.

Para continuar con el desarrollo de la investigación escogimos, de estos tres métodos, el average. Esta selección se hizo porque, a nuestro juicio, la zonificación que presenta este método es consistente con las zonas que se presentan en el mapa de precipitación anual del Atlas 1988 del Instituto Tomy Guardia.

De las cinco zonas formadas en este método se tomaron las estaciones que tienen una mayor cantidad de años de registros, las cuales son: Agua Clara que representa al grupo A; Cristóbal y Gatún que representa al grupo B; Monte Lirio y Barro Colorado

que representa al grupo C; Alhajuela y Gamboa que representa al grupo D y la estación de Balboa Heights que representa al grupo E.

**Estudio de la Tendencia de la Precipitación Pluvial.**

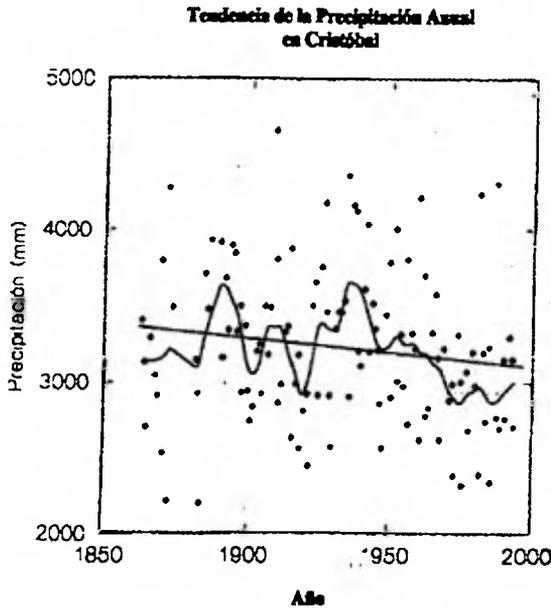
En publicaciones más recientes (Windsor, 1990) analizó sitios ubicados en la cuenca del canal, donde sus resultados fueron que aún continuaba en los sitios de Monte Lirio y Barro Colorado el descenso en la precipitación y, además, en casi todas las estaciones ubicadas en el centro del Istmo.

Sin embargo, registros recientes (aprox. 10 años) muestran un relativo aumento en la precipitación anual en varias de las estaciones ubicadas en la cuenca del Canal (Steve Paton, com. per.). Llevándonos a preguntar si la tendencia de la precipitación anual de las estaciones meteorológicas de la cuenca del Canal descritas por Windsor y colaboradores puede estar cambiando.

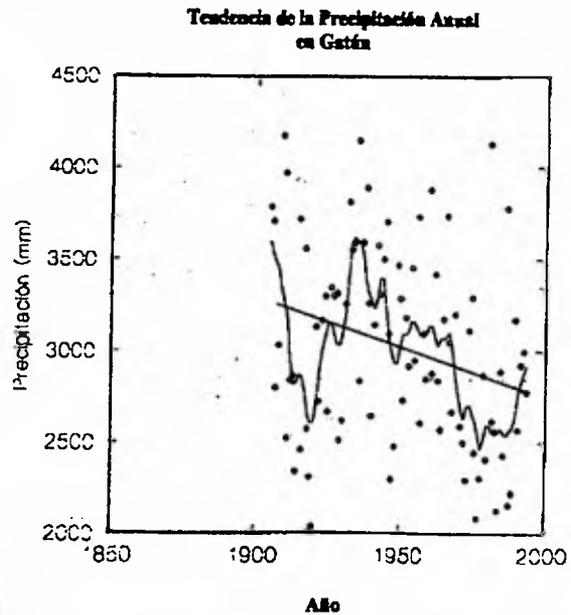
Para este estudio de la tendencia de la precipitación pluvial anual utilizamos el método de regresión lineal para comparar nuestros resultados con

los del Dr. Windsor y complementarlo con el método de LOWES para visualizar la tendencia de una forma más detallada. Véase las siguientes gráficas

GRÁFICA #4

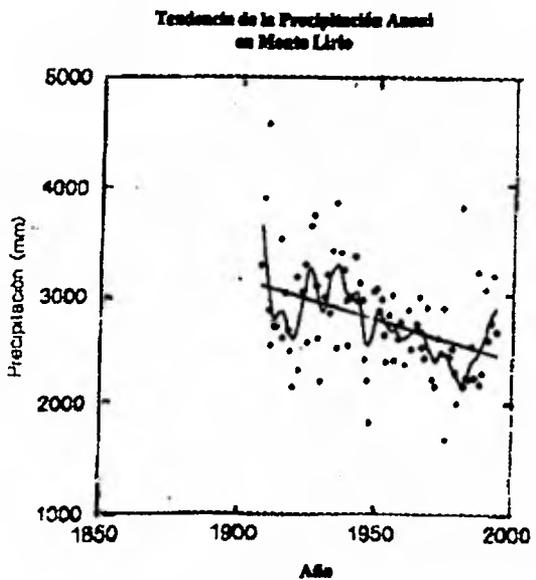


GRÁFICA #5

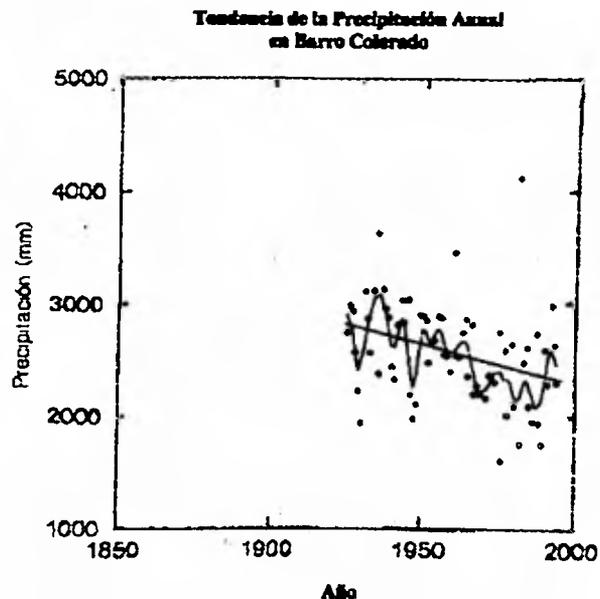


Para la zona B que está representada por las estaciones de Gatún y Cristóbal se presenta una tendencia general negativa que es más marcada en Gatún (pendiente = -5.4 mm;  $r = -0.266$ ) que en Cristóbal (pendiente = -1.89 mm;  $r = -0.137$ )

GRÁFICA #6

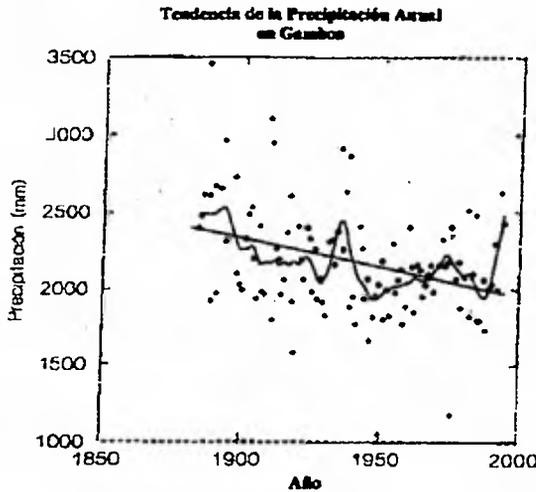


GRÁFICA #7

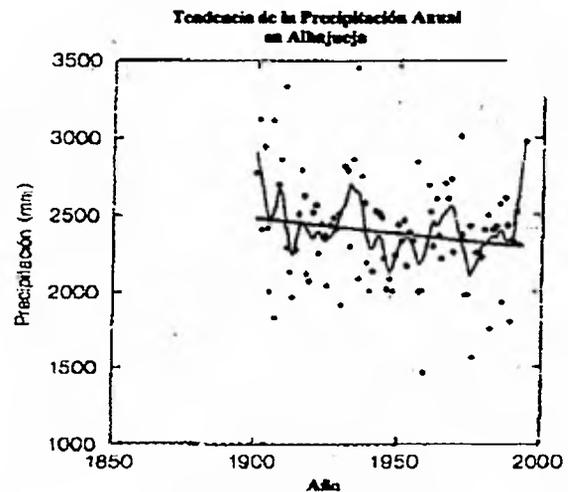


En las estaciones de Monte Lirio (pendiente = -7.98 mm;  $r = -0.407$ ) y Barro Colorado (pendiente = -7.45 mm;  $r = -0.321$ ) que son las estaciones representativas de la zona C, también se muestra una tendencia general negativa.

GRÁFICA#8

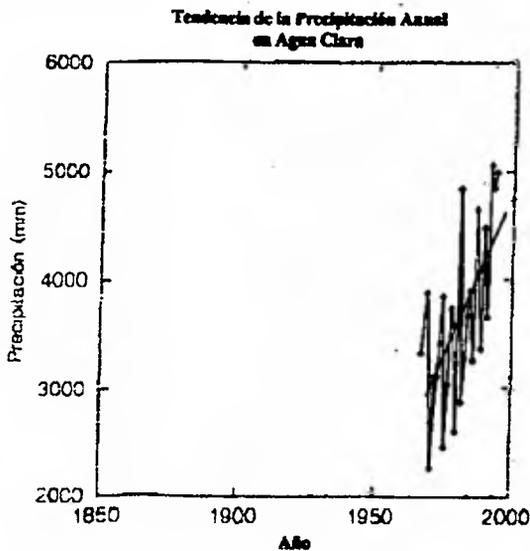


GRÁFICA#9

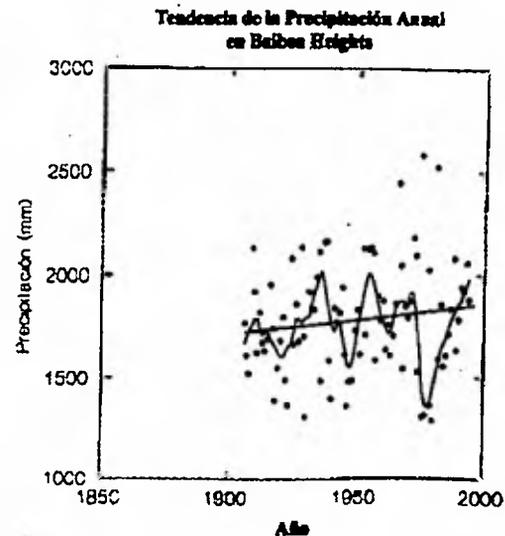


Al igual que las otras zonas mencionadas anteriormente, la zona D, Gamboa (pendiente = -3.77 mm;  $r = -0.354$ ) y Alhajucla (pendiente = -1.89 mm;  $r = -0.140$ ) presenta también una tendencia general negativa. Además, al utilizar el procedimiento de LOWES estas zonas ya descritas presentan un aparente aumento entre los últimos 10 y 15 años aproximadamente.

GRÁFICA#10



GRÁFICA#11



En cambio las zonas A y E, la estación de Agua Clara (pendiente = 60.46 mm;  $r = 0.609$ ) y Balboa Heights (pendiente = 1.39 mm;  $r = 0.133$ ) presentan una tendencia general positiva, donde la tendencia que se presenta en la zona A puede ser un indicador del aumento que hemos mencionado con respecto a las zonas cuya tendencia general es negativa, ya que las estaciones de la zona A tienen una cantidad a lo sumo de 27 años de registros.

En la tabla siguiente mostramos los resultados de las pruebas estadísticas:

**Tabla # 1**  
**Resultados de la Tendencia de la Precipitación Anual**

Zona	Estación	Pendiente	R	Probabilidad del Estadígrafo (p)
A	Agua Clara	60.46 mm	0.609	0.0004**
B	Gatún	-5.44 mm	-0.266	0.006*
B	Cristóbal	-1.89 mm	-0.137	0.071
C	Monte Lirio	-7.98 mm	-0.407	0.001**
C	Barro Colorado	-7.45 mm	-0.321	0.002*
D	Gamboa	-3.77 mm	-0.354	0.001**
D	Alhajuela	-1.89 mm	-0.140	0.092
E	Balboa Heihts	1.39 mm	0.133	0.107

Nota: Los valores con (\*) son inferiores a un nivel de 1% al igual que los valores con (\*\*) sólo que estos últimos son más significativos.

Con los resultados de la regresión lineal aceptamos la hipótesis de que las tendencias generales a disminuir de la precipitación observadas por el Dr. Windsor no han cambiado. No obstante, los resultados con el procedimiento de Lowes que utilizamos, no indican que la precipitación seguirá disminuyendo; además, observamos que la tendencia de la precipitación no es lineal, ya que se presentan variaciones en el comportamiento de la precipitación; y que en los últimos registros se está presentando un aumento que podría ser el inicio de una nueva fase o ciclo de la precipitación en la cuenca. Al comparar ambos métodos simultáneamente, se visualiza que el modelo de regresión lineal no es el más adecuado ya que los datos no siguen un patrón lineal, inclusive dando inicio a posibles ciclos; y que modelos no lineales pueden ser más aptos para la descripción de la tendencia que es lo que se observa con el Lowes. Por lo tanto, hay que ser, por lo menos, un poco escéptico cuando interpretamos los resultados del análisis de regresión lineal.

### Estudio del Efecto del "ENOS" en la Precipitación Pluvial en la Cuenca.

Hemos podido observar que en los registros de precipitación pluvial de las distintas estaciones se observan variaciones, las cuales podrían ser efectos del ENOS en sus distintas magnitudes y fases, el cual puede estar contribuyendo en la tendencia general negativa de la precipitación. Con el fin de contrastar esta hipótesis, realizamos tres tipos de análisis.

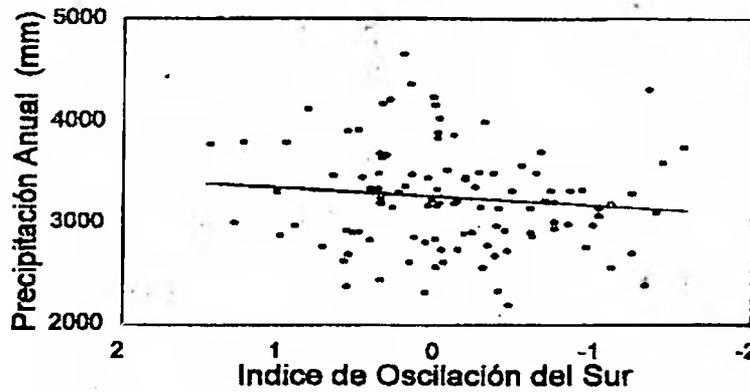
En el primer análisis utilizamos los datos de precipitación pluvial anual para verificar la hipótesis de que si el ENOS afecta la precipitación pluvial anual de las diferentes zonas o grupos, utilizándose el método de regresión lineal entre la precipitación pluvial anual de las estaciones meteorológicas con más años de registros (Cristóbal, Gatún, Monte Lirio, Isla Barro Colorado, Alhajuela, Gamboa y Balboa Heights) y el Índice de Oscilación del Sur (I.O.S.) promedio anual. De esta regresión se realizó la prueba correspondiente para el coeficiente de regresión. Esta prueba no se efectuó para las estaciones de Agua Clara, San Miguel

y Escandalosa, ya que presentan a lo sumo 27 años de registros, lo cual no se considera suficiente para realizar esta clase de análisis, dado que este período

incluye pocos eventos del ENOS. Véase las siguientes gráficas:

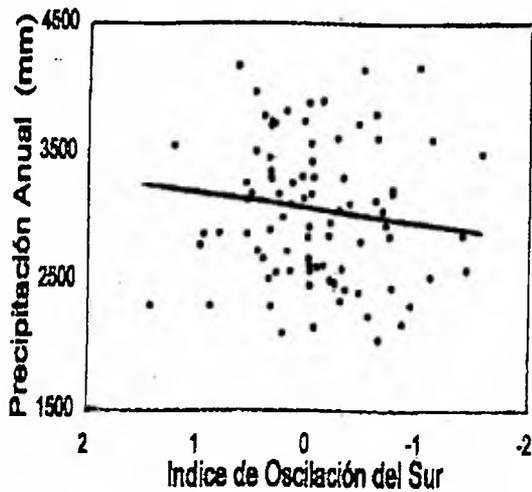
GRÁFICA # 12

**Efecto de ENOS sobre Precipitación (CRISTOBAL)**



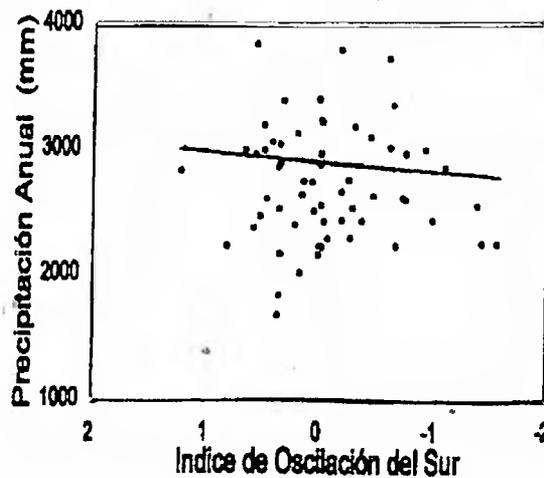
GRÁFICA #13

**Efecto de ENOS sobre Precipitación (GATUN)**



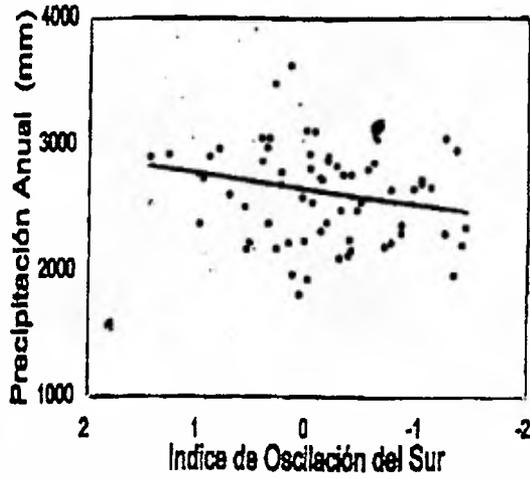
GRÁFICA #14

**Efecto de ENOS sobre Precipitación (Monte Lirio)**



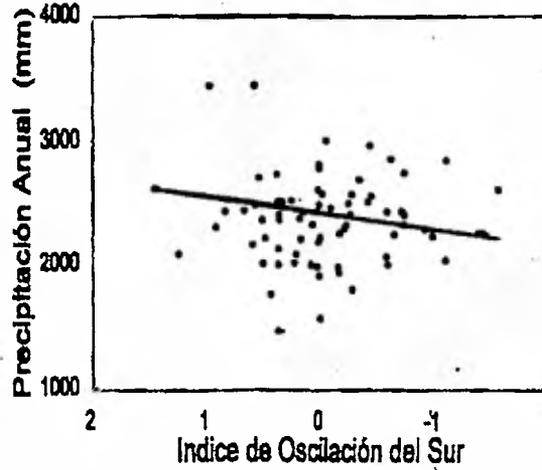
GRÁFICA #15

**Efecto de ENOS sobre Precipitación  
(Isla Barro Colorado)**



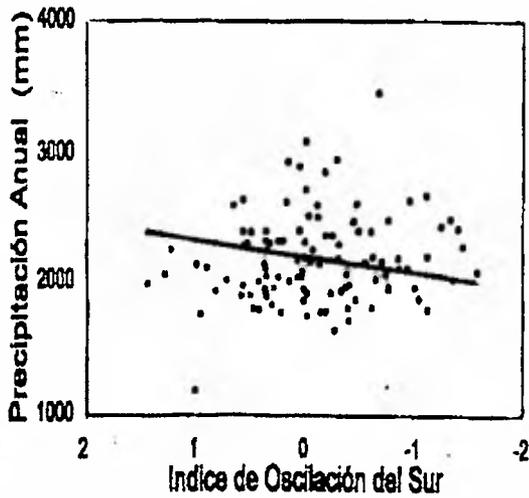
GRÁFICA #16

**Efecto de ENOS sobre Precipitación  
(Alhajuela)**



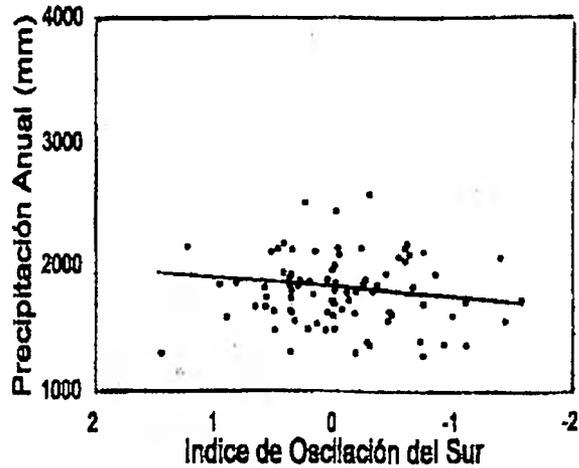
GRÁFICA #17

**Efecto de ENOS sobre Precipitación  
(GAMBOA)**



GRÁFICA #18

**Efecto de ENOS sobre Precipitación  
(Balboa Heights)**



En la tabla siguiente presentamos los resultados del coeficiente de regresión, la probabilidad de ocurrencia del estadígrafo (para una prueba bilateral colas) y el valor de  $r$ :

**Tabla # 2**  
**Resultados del ENOS en la Precipitación Anual**

Estación	Coefficiente de Regresión	$r$	Probabilidad del Estadígrafo ( $p$ )
BAHT	90.0	0.213	0.089
Gamboa	127.6	0.260	0.006**
Alajuela	125.4	0.242	0.019*
Barro Colorado	134.6	0.209	0.092
Monte Lirio	118.8	0.170	0.123
Gatún	127.2	0.174	0.102
Cristóbal	94.2	0.129	0.179

Nota: Los valores con (\*) son inferiores a un nivel de 5%, los valores con (\*\*) son inferiores a un nivel de 1%.

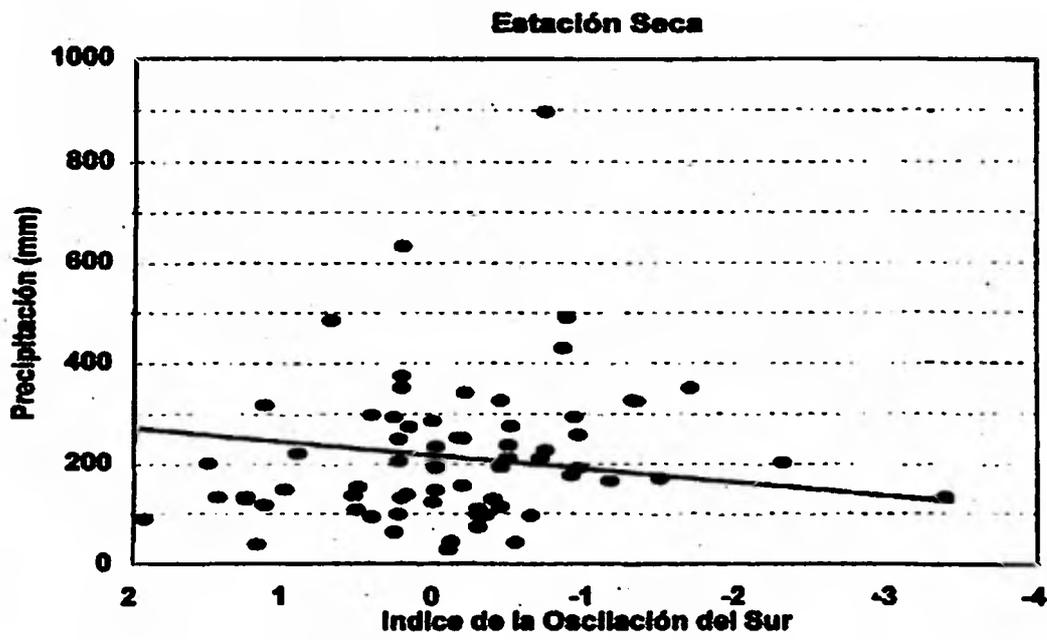
De lo anterior hemos obtenido que en la precipitación anual hay una relación lineal entre el ENOS y el efecto de reducción de la precipitación sólo para las estaciones ubicadas en el centro de la cuenca, lo que hemos denominado la zona D (representada por las estaciones de Gamboa y Alajuela con mayor cantidad de años de registros para esta zona).

En el segundo análisis de Barro Colorado, utilizamos la precipitación total para cada cuatro meses en la contrastación de las hipótesis nulas, que consiste en que la precipitación pluvial en la estación seca y en la estación lluviosa (lluvia 1 y lluvia 2) no está siendo afectada por el ENOS; y utilizamos aquí el método de regresión lineal entre la precipitación total para cada uno de los tres intervalos versus el I.O.S. promedio para cada cuatro meses, seguido de las pruebas correspondientes para cada uno de los coeficientes de regresión.

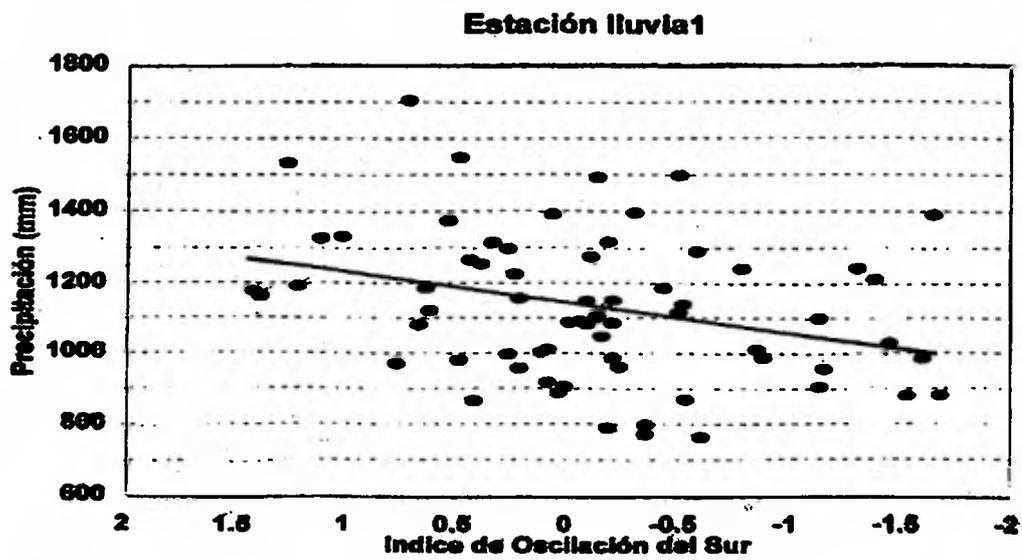
Para este segundo análisis, utilizamos solamente los registros de precipitación de la estación

meteorológica de Barro Colorado, porque la misma, además de ser una de las estaciones con mayor cantidad de años de registros, cuenta, además, con los registros mensuales y totales de precipitación, situación que no logramos en las demás estaciones. Estos registros diarios fueron divididos en intervalos de cuatro meses los cuales son: de enero a abril (estación seca); de mayo a agosto (lluvia 1) y de septiembre a diciembre (lluvia 2). Esta división la hicimos a manera de exploración, ya que en nuestro país se presentan dos estaciones climáticas muy marcadas, y como la estación lluviosa dura aproximadamente ocho meses, se dividió en dos intervalos: el primero cuando inicia la estación, y el segundo, cuando se presentan las mayores precipitaciones, para tener una mejor resolución del posible efecto del ENOS. Esta división la realizamos para explorar la posibilidad que el ENOS afecta en una manera distinta la primera y segunda mitad de la estación lluviosa. Véase las siguientes gráficas:

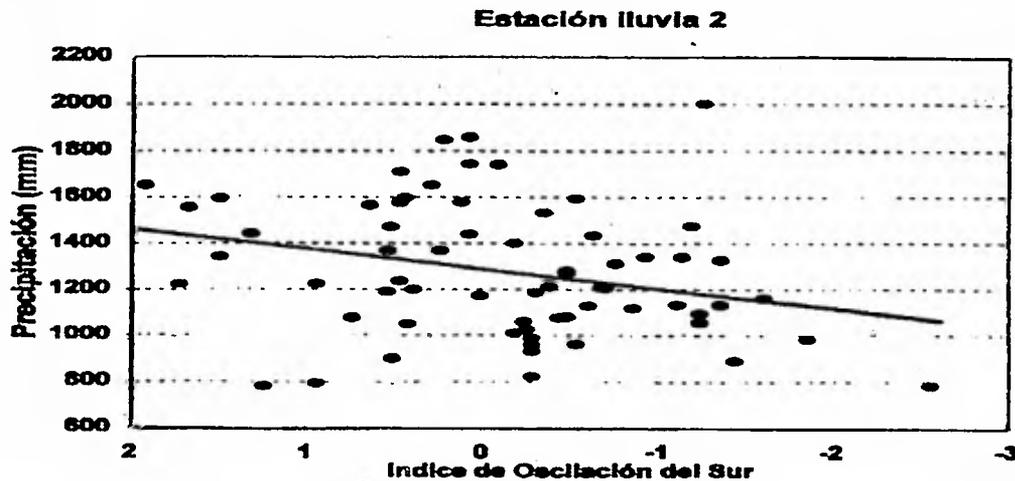
GRÁFICA#19



GRÁFICA#20



GRÁFICA #21



Además, en el tercer análisis, para contrastar la hipótesis de la diferencia del efecto del ENOS en lluvia1 y lluvia 2, utilizamos el estadístico correspondiente para la comparación de dos coeficientes de regresión, obteniéndose que el valor del estadígrafo para la comparación de los coeficientes de regresión de lluvia1 y lluvia2 es igual a  $-0.2119$  con una probabilidad menor de 0.01.

De estos resultados podemos decir que en cuanto a la precipitación en las estaciones climáticas (lluviosa y seca) en Barro Colorado se presenta el efecto sólo para la estación lluviosa. Sin embargo, para la Isla de Barro Colorado, no encontramos una relación significativa en cuanto al ENOS y la precipitación anual. Esta ausencia puede estar dándose, ya que la no relación del ENOS y la precipitación de la estación seca puede estar contrarrestando la relación que existe entre el ENOS y la precipitación de la estación lluviosa, lo cual podría estar ocurriendo de una manera similar para las zonas que no presentan una relación del ENOS y la precipitación anual.

### Discusión.

Quizás surja la pregunta ¿ qué ha afectado los registros para que tengan una tendencia negativa con

respecto a la precipitación? Pues, los factores pueden ser varios. Uno de los que pueden estar influyendo en esta tendencia general negativa que se presenta en tres de las cinco zonas, es la forma en que se han recolectado los datos, ya que hasta el 1° de septiembre de 1971 los datos de precipitación se extraían de registros gráficos de 0.25 mm (0.01 pulg). Desde entonces, la precipitación se mide en unidades de 2.5 mm(0.1 pulg) a intervalos de 15 minutos mediante equipos automáticos. Al hacer este cambio de sistemas se podría estar sobreestimando la precipitación acumulada.

Otro factor que podría estar contribuyendo en la tendencia es la influencia del hombre con la deforestación en el ecosistema de la Cuenca del Canal. También cabe la posibilidad del factor aleatorio de la precipitación anual o de factores que no hemos contemplado en esta investigación.

Podríamos mencionar también como otro factor el calentamiento global o "efecto invernadero" que está afectando hoy día el clima global. Según el cuaderno de Educación Ambiental Todos se calcula que las actividades industriales vierten cada año a la atmósfera casi 20.000 millones de toneladas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y ciento de millones de toneladas de

otros "gases invernaderos". Todo esto hace que la temperatura de la corteza terrestre aumente por encima de los márgenes naturales de variación, contribuyendo a posibles cambios en la circulación del océano y la atmósfera; estos cambios por si mismos pueden estar alterando los patrones de precipitación.

Por último nos queda la interrogante ¿cuál de los factores que hemos mencionado afecta en un mayor grado la tendencia? No somos especialistas en meteorología; pero para nosotros todos los factores que hemos mencionado tienen su influencia, ya que ellos forman parte, ya sea del sistema atmosférico o del sistema oceánico, donde la alteración natural o provocada por el hombre causa que también se alteren los componentes de estos sistemas.

## CONCLUSIONES

Luego de haber realizado los análisis estadísticos para la precipitación pluvial anual, podemos indicar lo siguiente:

1. Debido a las diferentes condiciones geográficas y climáticas de nuestro país, existen cinco zonas

dentro del Canal, donde las estaciones meteorológicas muestran patrones de precipitación similares.

2. Cuando la serie de tiempo corresponde a una variable climatológica y utilizamos el modelo de regresión lineal, la pendiente de ésta sólo nos podría explicar posibles condiciones del pasado; y como el clima sufre cambios constantemente, el método de regresión lineal es ineficiente para predecir la tendencia a largo plazo de este tipo de serie.
3. Según la magnitud con que se presente el ENOS, éste causa una reducción en la precipitación pluvial anual para la zona ubicada en el centro del Istmo (zona D, representada por las estaciones de Gamboa y Alhajuela).
4. Además, al utilizar los datos diarios de la estación de Barro Colorado, encontramos que el ENOS tiene un efecto de reducción sobre la precipitación en la estación lluviosa en Barro Colorado. Por el contrario, para la estación seca no hay un efecto significativo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ALVARADO, LUIS A. 1985. **La sedimentación en el Lago Alhajuela**. En, *Agonía de la Naturaleza: Ensayo sobre el costo ambiental del desarrollo panameño*. Stanley Heckadon Moreno y Jaime E. Gonzáles (editores). Impretex S. A. Panamá. 103 pp.
2. ASOCIACIÓN NACIONAL PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA. 1995. **Evaluación Ecológica de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá**. ANCÓN. Panamá. 98 pp.
3. CENTRE UNESCO DE CATALUNYA. 1993. **TODOS**. Cuadernos de Educación Ambiental. Centre UNESCO de Catalunya. Barcelona, España. No.2. s./p.
4. HART, MICHAEL S. 1992. **Analysis of Rainfall Data in the Panama Canal for the Presence of a trend**. Meteorological and Hydrographic Branch Engineering Division Panama Canal Commission. Balboa Heights, Panamá. 205 pp.

<http://naulu.soest.hawaii.edu/index.html>

<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/paleo.html>

5. INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL TOMY GUARDIA. 1988. **Atlas Nacional de la República de Panamá**. IGNTG. 232 pp.
6. JOHNSON, RICHARD A. Y D.W. WICHERN. 1982. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey. 594 pp.
7. KENDALL, MAURICE G Y J.K. ORD. 1990. **Time Series**. 3ª edición. Oxford University Press. Gran Bretaña. 296 pp.
8. NARANJO, PLUTARCO. 1985. **El Fenómeno El Niño y sus Efectos en el Clima del Ecuador**. En, **El Niño en las Islas Galápagos. El Evento de 1982-83**. Gary Robinson y Eugenia M. del Pino (Editores). Fundación Charles Darwin para las Islas Galápagos. Quito, Ecuador. 3-27 pp.
9. PATON, STEVEN R. Y COLABORADORES. 1994. **Introducción a la Bioestadística de Campo**. Fundación Charles Darwin para las Islas Galápagos. Ecuador. 143 pp.
10. PHILANDER, GEORGE S. 1990. **El Niño, la Niña and the Southern Oscillation**. Academic Press, Inc. San Diego, California. 293 pp.
11. RASMUSSEN, EUGENE M. Y M.J. HALL. 1983. "El Niño: Great Equatorial Warming Event of 1982-83". **Weatherwise**. 36: 167-175 pp.
12. REPORTS TO THE NATION ON OUR CHANGING PLANET. 1994. **El Niño and Climate Prediction**. Spring. No.3. 23 pp.
13. WINDSOR, DONALD M. 1990. **Climate and Moisture Variability in a Tropical Forest: Long-Term Records from BCI**. Smithsonian Institution, Press. Washington D.C. 145 pp.
14. WINDSOR, DONALD M Y S. RAND. 1985. **Cambios Climáticos en los Registros de Lluvias en Panamá y Costa Rica**. En, **Agonía de la Naturaleza, Ensayos sobre el Costo Ambiental del Desarrollo Panameño**. Stanley Heckadon Moreno y Jaime Espinosa G. (Editores). Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá y Smithsonian Tropical Research Institute. Panamá. 147-164 pp.