

Nota Técnica

CAMBIO CLIMÁTICO: CUANTIFICACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL CLIMA EN TURRIALBA EN EL ÚLTIMO MEDIO SIGLO

Sergio Abarca Monge¹

RESUMEN

Este trabajo se realizó con los datos de la Estación Meteorológica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) situado a 602 msnm, 9° 53' latitud Norte y 83° 38' longitud Oeste. De acuerdo con el Sistema de Clasificación de Zonas de Vida Ecológicas de L. Holdridge (1978) se ubica en Bosque Húmedo Premontano Tropical. Se analizaron cuatro variables climáticas, precipitación en un periodo de 67 años, temperatura y humedad relativa en 51 años y radiación solar en 41 años, todas en forma consecutiva hasta el 2008. La temperatura media diaria año-1 aumentó en 0,005 °C a-1, para un incremento de 0,25 °C entre 1958 y 2008. Los valores anuales de temperatura máxima y mínima absolutas, confirman que hubo un incremento significativo en las temperaturas extremas, y que el incremento mayor se dio en las temperaturas máximas (0,043 °C a-1), mientras para las mínimas absolutas se encontraron valores de 0,028 °C a-1. En cuanto a la precipitación, no se observó una tendencia sostenida y definida. No obstante, se obtuvo que entre 1942 y 1970 el promedio se situó muy cercano al promedio general histórico, con fluctuaciones entre años bastante grandes. Entre 1971 y 1995 fue menor la precipitación, con una reducción considerable de la variación interanual, y el último intervalo (1996-2008) significativamente diferente ($P \leq 0,05$) a los otros dos, se presentó una precipitación sobre el promedio general y con variaciones interanuales aun más pequeñas. Con relación a la humedad relativa promedio, mínima promedio y mínima absoluta se observó tasas de incremento medio anual significativo ($P \leq 0,05$) para el periodo analizado. En conclusión, a medida que los años se hicieron más calientes, la radiación solar disminuyó y la humedad relativa aumentó en forma significativa, apoyando la hipótesis de una mayor nubosidad. La precipitación anual se incrementó en 13,50 % en los últimos 13 años con respecto al promedio histórico, y los meses que contribuyeron a ese incremento fueron enero, mayo, agosto y noviembre.

¹ Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), Turrialba, Convenio MAG/ UCR (Ministerio de Agricultura y Ganadería/ Universidad de Costa Rica)

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno que está produciendo variaciones en la biosfera y afecta a los seres vivos. La agricultura no escapa a sus efectos, y se ha sugerido el monitoreo y seguimiento de este fenómeno, lo que permite medir los cambios en el clima, y los efectos que éstos traerán a los ecosistemas, y a las actividades del hombre.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) indica que el calentamiento global llevará a una intensificación del ciclo hidrológico global (IPCC 2003). En las regiones tropicales, los efectos del cambio climático, aparte del incremento de la temperatura, tendrán una mayor nubosidad y por consiguiente una mayor precipitación (Mazza y Roth 1999). Los modelos de simulación sobre los escenarios climáticos y su impacto sugieren una reducción en la producción agrícola más severa en las regiones tropicales (IPCC 2001). Lo anterior se debe a que, de acuerdo a los modelos, los cultivos pueden absorber hasta incrementos entre 2 - 3 grados de temperatura antes de presentar signos de stress térmico. Sin embargo, en los trópicos los cultivos exhiben una mayor susceptibilidad al aumento de temperatura, dado que crecen bajo condiciones cercanas a la máxima temperatura tolerable (Easterling y Apps 2005). En la mayoría de los casos el cambio climático, tiene influencia directa adversa en la producción agrícola y su calidad; por lo tanto, las estrategias agro-meteorológicas para enfrentar los cambios de clima, son esenciales para prevenir impactos negativos en la sociedad y el desarrollo económico (Cerri *et al.* 2007). A manera de ejemplo, se ha considerado que, por efectos del clima, está cambiando la zonificación agroclimática del café arábigo en Brasil (Silva *et al.* 2006). Uno de los puntos más sensibles para la agricultura, con relación a las variaciones del clima, los es el comportamiento de las plagas, enfermedades y malezas. En consecuencia, se prevé un incremento en la incidencia, acortamiento del ciclo biológico, aumento de la virulencia de las plagas, y susceptibilidad de los cultivos (Bordon *et al.* 2006)

En este sentido se podría esperar que el efecto combinado de cambios en la temperatura, los patrones de lluvia, tasas de evapotranspiración y concentración de CO₂, puedan afectar las interacciones biológicas de los seres vivos que habitan en los diferentes ecosistemas de la faja tropical. Por lo tanto, los agro-ecosistemas serán afectados, tanto en las entradas y salidas como en las relaciones y procesos entre los componentes del sistema. Dado que las cantidades y distribución de elementos climáticos como lluvia, temperatura, humedad relativa y radiación solar son vistos conceptualmente como ingresos al sistema cultivo, y no podemos controlar aspectos relacionados con la forma, la cantidad y la distribución del ingreso, es necesario buscar mecanismos de adaptación de los sistemas agrícolas ante los cambios que se están sucediendo en el clima.

Entre más nos acerquemos de los polos hacia el ecuador, mayor importancia tienen los factores biológicos en la producción de los cultivos, la cantidad de especies que interactúan en el agro-ecosistema se incrementan, y los factores que afectan los rendimientos de las cosechas son más difíciles de manejar (Ewel 1971). En el caso de Costa Rica, donde hay gran diversidad de microclimas es posible que las prácticas agrícolas y el manejo de los cultivos con relación al cambio climático presenten variaciones.

Respecto a la región de Turrialba, en los últimos años se han reportado varios eventos de carácter climático a los que se les atribuyen pérdidas de cosechas, y menoscabo de la producción animal (Convenio MAG/UCR 2005). Por otro lado, Turrialba cuenta con un número adecuado de estaciones meteorológicas dispersas y aisladas, no obstante es una de las regiones agrícolas con más cantidad de datos meteorológicos de buena calidad en el país. Especialmente los que suministra desde 1942 la Estación Meteorológica del CATIE en precipitación y después de 1958 en otras variables.

El objetivo del presente estudio fue hacer una revisión de los datos meteorológicos de

Turrialba, con el fin de observar las tendencias de las variables climáticas que afectan la agricultura, e iniciar la medición cuantitativa de los efectos del cambio climático en la región, a fin de realizar los ajustes en los modelos de producción agropecuaria que procuren un aceptable grado de adaptación y a la vez mitiguen los efectos futuros del mismo cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente estudio se tomaron los datos de la Estación Meteorológica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) situado a 602 msnm, 9°53' latitud Norte y 83°38' longitud Oeste. De acuerdo con el sistema de clasificación de zonas de vida ecológicas de L. Holdridge (1978), el estudio se ubicó en una zona de vida de Bosque Húmedo Premontano Tropical.

Los datos de precipitación que sirvieron de base son del periodo comprendido entre enero de 1942 y diciembre de 2008, con un acumulado de 67 años. Los datos de temperatura y humedad relativa comprenden el periodo entre enero de 1958 y diciembre de 2008, para un total de 51 años. Con relación a los datos de radiación solar éstos abarcaron de enero de 1968 a diciembre de 2008, un periodo de 41 años.

Las variables evaluadas fueron: temperatura diaria en grados Celsius: media, media máxima, media mínima, máxima absoluta, y mínima absoluta. Precipitación promedio diaria en milímetros de lluvia. Humedad relativa promedio diaria en porcentaje. Radiación solar promedio diario en $\text{mJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (mega julios por metro cuadrado por día).

Para el análisis se utilizaron los valores promedio anuales y mensuales por día para temperatura, humedad relativa y radiación solar. Para precipitación se utilizaron los totales anuales y mensuales. Se corrieron dos modelos estadísticos, el primero por año para el conjunto de datos de cada variable, y el segundo por periodos de décadas; en

el caso de la precipitación, adicionalmente se corrió un modelo por intervalos. Los datos entre años se analizaron por medio de regresión, utilizando en forma bivariante los promedios mensuales y anuales. Cuando se utilizaron décadas e intervalos como fuente de variación, se realizaron pruebas de diferencias de medias de Tukey para décadas y Student para intervalos de precipitación respectivamente, siguiendo una metodología similar a la utilizada por Power y Mills (2005). El paquete estadístico que se utilizó fue JMP7.

Para la definición de intervalos, en el caso de la precipitación, estos se establecieron de la siguiente forma. Primer intervalo: desde el primer año de toma de datos (1942) hasta el primer evento climatológico de mayor impacto, por efecto de las lluvias (1970), catalogado por personas de más de 60 años de edad como de importancia; el segundo comprendido entre el año posterior al primer evento climatológico de importancia (1971) al segundo catalogado de importancia por personas de más de cuarenta años (1996). El tercero los años restantes entre el último evento hasta diciembre de 2008.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura

La temperatura es la principal variable meteorológica en el monitoreo del cambio climático, dado que es la forma de expresión mejor entendible del aumento del calor en la biosfera, desencadenante de una serie de cambios en el clima y los ecosistemas. En el siglo pasado se experimentó un aumento en la temperatura del planeta de 0,8 °C, con un incremento mayor en los últimos años. Por lo tanto es necesario conocer la magnitud de las variaciones de la temperatura en las diferentes regiones agroecológicas, para entender mejor los cambios que experimentarán los sistemas naturales y los productivos ante la variación de las condiciones de los microclimas. En ese sentido es importante conocer las variaciones de la temperatura en la región de Turrialba.

En los datos de temperatura media diaria año-1 se observó una tendencia no significativa a incrementar (Figura 1). El incremento anual fue de 0,005 °C a-1, para un aumento de 0,25 °C entre 1958 y 2008. No obstante, al hacer el análisis de los promedios por décadas, se obtuvo diferencias significativas ($P \leq 0003$) entre las diferentes décadas. En el Cuadro 1 se presentan los valores de temperatura promedio por década, de esta forma se muestra que el promedio de la temperatura media diaria en la década 1960-69 fue de 21,8 °C d-1a-1, mientras el valor obtenido para el periodo 2000-08 fue de 22,3 °C d-1a-1. Al analizar la variación interanual de la temperatura máxima, se obtuvo un incremento significativo ($P \geq 0,0061$) de 0,04 °C a-1, lo cual es considerable, ya que para el periodo 1958-2008 alcanzó los 2 °C.

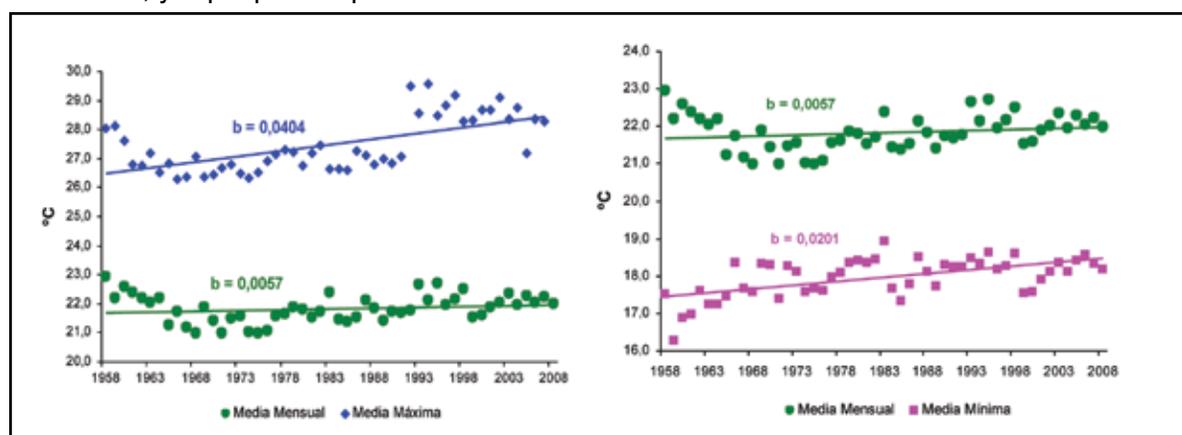


Figura 1. Temperatura media, media máxima y media mínima mensual por año. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1958-2008. 2008.

Cuadro 1. Temperatura promedio diaria anual, por década. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1958-2008.

Periodo	Media	Media Máxima	Media Mínima	Media Máxima Absoluta	Media Mínima Absoluta
	°C d-1a-1				
2000-08	22,03 ^a	28,40 ^a	18,18 ^a	30,83 ^a	15,71 ^a
1990-99	22,11 ^{ab}	28,34 ^a	18,27 ^a	30,65 ^a	15,80 ^a
1980-89	21,70 ^{abc}	26,97 ^a	18,13 ^a	29,13 ^b	15,16 ^a
1970-79	21,36 ^{bc}	26,96 ^{ab}	17,93 ^{ab}	28,79 ^b	15,20 ^{ab}
1960-69	21,84 ^b	26,68 ^{bc}	17,53 ^{bc}	29,13 ^b	14,83 ^{bc}
1958-59	22,55 ^a	28,40 ^c	16,90 ^c	30,30 ^{ab}	13,90 ^c

Media en la misma columna con diferente letra, difieren significativamente ($\infty \leq 0,05$) LSM Tukey.

Con relación (Figura 1) a la temperatura mínima promedio diaria año-1 también se observó un incremento significativo ($P \geq 0,0001$) de 0,02 °C a-1, para una variación de 1,00 °C en el periodo en estudio. El hecho de que el ritmo de incremento de la temperatura promedio diaria año-1 no fuera significativa, posiblemente radique en la diferencia entre los valores para máxima y mínima, ya que el aumento promedio anual de la temperatura máxima fue el doble del aumento promedio anual de la temperatura mínima.

Los valores anuales de temperatura máxima y mínima absolutas (Figura 2), confirmaron que hubo un incremento significativo en las temperaturas extremas, y que el aumento mayor se dio en las temperaturas máximas (0,043 °C a-1), mientras para las mínimas absolutas se encontró un valor de 0,028 °C a-1. Con los valores para las diferentes mediciones de temperatura diaria año -1 y sus tasas de incrementos, se interpretó que la zona de Turrialba fue más caliente en los últimos años que cuatro décadas atrás.

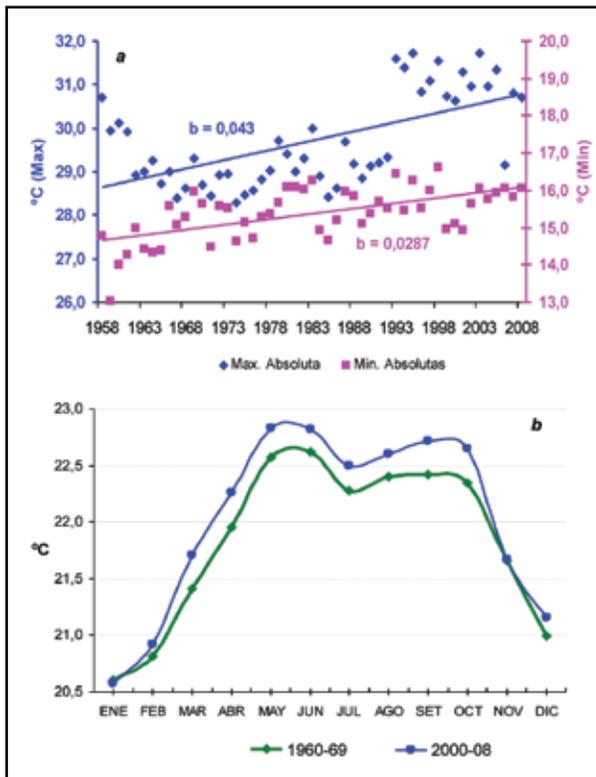


Figura 2. a) Temperatura máxima y mínima absoluta promedio anual, b) Temperatura promedio anual en dos décadas diferentes. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1950-2008.

Por lo tanto, los mecanismos fisiológicos y anatómicos de los organismos que componen los ecosistemas naturales y los agro-ecosistemas en la región se exigieron más, especialmente con relación a procesos como: fotosíntesis, respiración, transpiración y la formación de carbohidratos estructurales. Shibles y Villalobos (2001) indicaron las

relaciones metabólicas en los procesos fotosintéticos con respecto al aumento de temperatura, en términos de la asimilación de CO₂. Describieron una curva en forma de campana, situando la temperatura óptima para la fotosíntesis en las especies C₄ entre los 35 a 40 °C, mientras para las plantas C₃ entre 15 a 30 °C, para luego decender en forma pronunciada. En cuanto a la respiración se considera que incrementos en el ámbito de 10 a 30 °C indujeron un aumento exponencial de la respiración de mantenimiento, mientras que la respiración de crecimiento manifestó un incremento lineal y poco significativo en respuesta a este cambio de temperatura. En general, la temperatura óptima para respiración fue más alta que la temperatura óptima de fotosíntesis, este concepto cobró importancia en agricultura cuando se trata de introducir germoplasma a regiones con temperaturas más altas que aquellas de sus lugares de origen. Dado la insensibilidad de las plantas a incrementos de temperatura para mejorar su respiración con fines productivos y de crecimiento, y, al estar expuestas a una condición que favoreció la eliminación de CO₂ en detrimento de su incorporación, éstas no pueden producir la energía suficiente para llenar frutos y semillas, lo que trae como consecuencia la absorción reproductiva en muchos casos (Romero 2001). Con relación a la transpiración, se pudo indicar que el potencial hídrico de los cultivos no se vió fuertemente afectado, mientras las cantidades de agua en el suelo fueron adecuadas y la humedad relativa fue alta, apreciación que concuerda con los conceptos de Villalobos (2001).

En cuanto a la distribución de los cambios de temperatura por mes en el año, para el periodo comprendido entre 1958 y 2008, se observó una leve tendencia a incrementar en al menos 10 meses (Figura 3). En el Cuadro 2, se observan los valores de temperatura promedio máxima para las pendientes de curvas de modelos lineales, las cuales todas son positivas y estadísticamente significativas. De lo anterior se interpretó que para el periodo de tiempo comprendido en el estudio,

independiente del mes, conforme avanzaron los años, los momentos más calientes del día fueron aún más calientes, así mismo que los momentos menos calientes del día no fueron tan fríos como 50 años atrás. Esto confirmó, que tanto los valores de temperatura máxima como mínima diaria se elevaron en el periodo analizado en la zona de Turrialba.

Cuadro 2. Coeficientes de estimación lineal, para temperatura máxima y mínima mensual. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1958-2008. 2008.

Mes	Temperatura media máxima		Temperatura media mínima	
	m	b	m	b
Enero	0,029	-31,60	0,020	-23,45
Febrero	0,032	-36,85	0,021	-24,94
Marzo	0,031	-32,18	0,017	-17,51
Abril	0,037	-42,77	0,022	-26,95
Mayo	0,030	-31,67	0,024	-29,54
Junio	0,034	-38,88	0,017	-15,39
Julio	0,043	-57,50	0,018	-16,86
Agosto	0,045	-60,96	0,018	-16,39
Septiembre	0,048	-66,01	0,019	-18,83
Octubre	0,039	-50,10	0,019	-18,83
Noviembre	0,027	-27,63	0,021	-23,50
Diciembre	0,032	-38,03	0,021	-23,49

$y = m (\text{año}) - b$

En general, el periodo del año que presentó un mayor incremento de los valores de temperatura fue de marzo a octubre (Figuras 2b, 3a, 3b) los meses de septiembre y octubre presentaron los incrementos más fuertes al comparar los valores promedios de las décadas 1960-69 y 2000-08. Es posible que el incremento de temperatura estuviera relacionado a que la porción del día despejada fue más caliente aunque posiblemente más corta, luego la nubosidad se incrementó y no permitió el enfriamiento por las noches y madrugadas, cuando por lo general se presentaron las temperaturas mínimas.

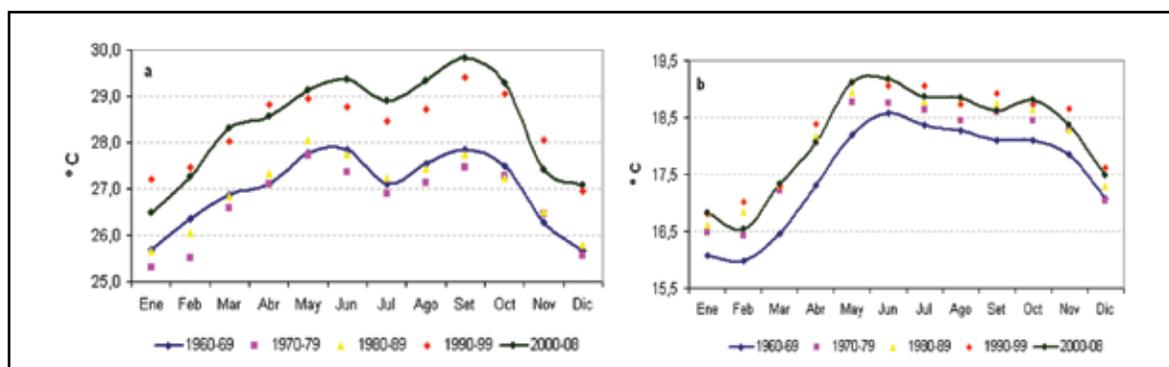


Figura 3 (a) y 3 (b). Temperatura a) máxima y b) mínima, diaria mensual promedio por década. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1960 – 2008. 2008.

De acuerdo con los datos obtenidos se concluye que la temperatura de Turrialba se incrementó para el periodo estudiado, especialmente en las últimas dos décadas, donde las variaciones tanto entre años como entre meses; así como entre las temperaturas máximas y mínimas se hicieron menores.

Precipitación

Normalmente se esperaría que la variación de precipitación fuera aparejada con la variación de la temperatura, sin embargo, no se observó una tendencia sostenida y definida de la precipitación anual (Figura 4). No obstante, los periodos de penuria agropecuaria en la zona por causa de las lluvias indicaron que la precipitación fue un factor ambiental de relevancia en la producción vegetal y animal, sobre todo en los últimos años. Lo anterior obligó a revisar de una manera apropiada los valores históricos de precipitación; por lo tanto, adicionalmente al análisis por año y por década, se realizó también un análisis en intervalos de tiempo definidos entre eventos climatológicos catalogados por la comunidad de gran magnitud. En general, se observó claramente, tres intervalos de años bien definidos. Estos tuvieron dos características básicas que los distinguieron entre sí, que fueron: el promedio, y las variaciones interanuales. Se observó que para el primer intervalo 1942-70 el promedio se situó muy cercano al promedio general histórico del periodo en análisis, con una fluctuación entre años bastante grande; el segundo intervalo (1971-95) fue de menos precipitación con una reducción considerable de la variación interanual, seguido del tercer y último intervalo (1996-2008) significativamente diferente ($P \leq 0,05$) a los otros dos, con precipitaciones sobre el promedio general y con variaciones interanuales aun más pequeñas. De esta manera, se sugiere que antes de 1970 lo normal eran las variaciones grandes entre años, no obstante en los últimos años ocurrió una variación mucho menor, y en los últimos 13 años adicionalmente un incremento de la precipitación anual.

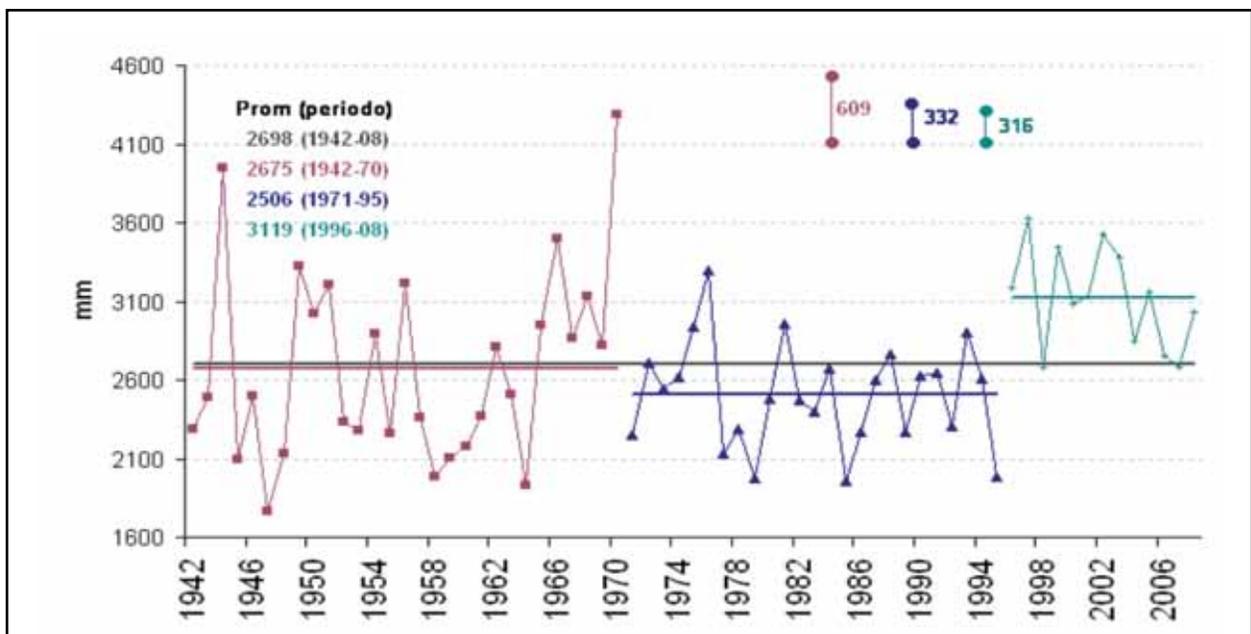


Figura 4. Precipitación promedio en tres periodos, desde 1942 hasta el 2006. Turrialba. Costa Rica. 2008.

Con respecto a la distribución mensual se observaron tres aspectos relevantes; el primero, al analizar las variaciones mensuales entre años, en los 67 años de datos para esta variable, se obtuvo un incremento significativo de la precipitación en el mes de agosto, que representó una diferencia en promedio de 100 mm entre los años 1942 y 2008 (Figuras 5). Así mismo, los datos mostraron una dispersión mayor en los últimos años con respecto a los primeros, lo que sugirió precipitaciones más variables para el mes analizado (Figura 5).

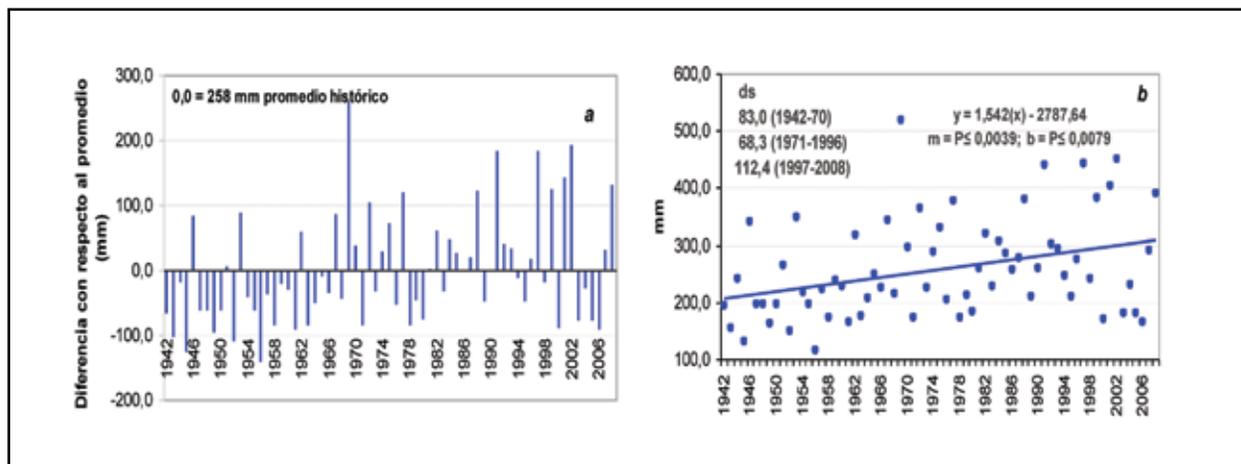


Figura 5. Variación de la precipitación del mes de agosto, a) con relación al promedio histórico del mes; b) en el periodo de 67 años. Turrialba, Costa Rica. 2008.

El segundo aspecto importante, fue la precipitación por décadas, donde se observó un incremento significativo ($P \leq 0,0173$) para el mes de enero. Haciendo una comparación, se pudo observar que el incremento para enero en periodo 2000 – 08 con respecto a periodos similares entre 1942 y 1999 fue de 48,00 a 68,20 %. En el Cuadro 3 se observan los valores promedio para los periodos analizados.

Cuadro 3. Promedio de precipitación por década para el mes de enero. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1942-2008.

Periodo	1942-49	1960-69	1970-79	1980-89	1990-99	2000-08
Prom. (mm)	164,10 ^{ab}	185,90 ^{ab}	174,85 ^{ab}	174,90 ^{ab}	112,90 ^b	3551,00 ^a

Media en la misma fila con diferente letra, difieren significativamente ($\infty \leq 0,05$) LSM Tukey.

El tercer aspecto, fue que el análisis de los tres intervalos, confirmó el incremento de lluvia en el mes de enero en los últimos años; en este caso para el promedio de los últimos 13 años. Adicionalmente, se observó un incremento significativo ($P \leq 0,03$) para los meses de mayo y noviembre. Se vió un incremento no significativo para los meses de febrero y abril, que de seguir la tendencia de aumento de la precipitación, en pocos años podría confirmarse como significativos.

Los datos sobre la distribución sugirieron, que durante el periodo comprendido entre 1942 y 2008, hubo cambios en el patrón de las lluvias durante el año, con un incremento de la precipitación en los meses de enero, mayo, agosto y noviembre. Lo anterior trajo como consecuencia que en los últimos años los periodos de humedad fueron más largos e intensos; lo que provocó mayor posibilidad de encharcamiento en terrenos de pastizales, más escorrentía en suelos descubiertos

o con poca vegetación, e inundaciones de corta duración en otros cultivos. Por lo tanto, es posible que los periodos de hipoxia e inclusive anoxia de los sistemas radicales de las coberturas vegetales fueron mayores a los que se daban décadas atrás. Lo anterior sugiere la posibilidad de que ocurriera una elevación del nivel freático, ya que pudo existir la posibilidad que se presentara una elevación del nivel freático en unos casos, en otros, la compactación producida por el arado y pesuña del ganado, a unos centímetros de la superficie de los suelos causó compactación, así como, en algunos casos la compactación se presentó debido a la exposición de capas de suelos de material parental; más arcillosos e impermeables producto de la escorrentía, el manejo de los suelos o por condiciones del cultivo.

Esto es de importancia en especies de pastos exóticos de origen de sabana sub-húmeda como *Brachiaria sp*, los cuales tienen poca plasticidad para adaptarse a suelos saturados de humedad; como las condiciones que prevalecen en algunos meses en Turrialba y la Zona Atlántica de Costa Rica (Casasola 1998). Otros cultivos de la familia musaceae, como el banano, donde además de detener el crecimiento radicular en periodos iniciales de hipoxia, se puede aumentar la susceptibilidad a enfermedades como *Fusarium oxysporum* (Aguilar et al. 2001).

Humedad relativa

Con relación a la humedad relativa promedio, mínima promedio y mínima absoluta se observó un incremento anual significativo ($P \leq 0,05$) para el periodo analizado (Figura 6). Al observar los periodos correspondientes a décadas, se confirmó la tendencia a incrementar la humedad relativa promedio mínima y mínima absoluta, de acuerdo con el Cuadro 4.

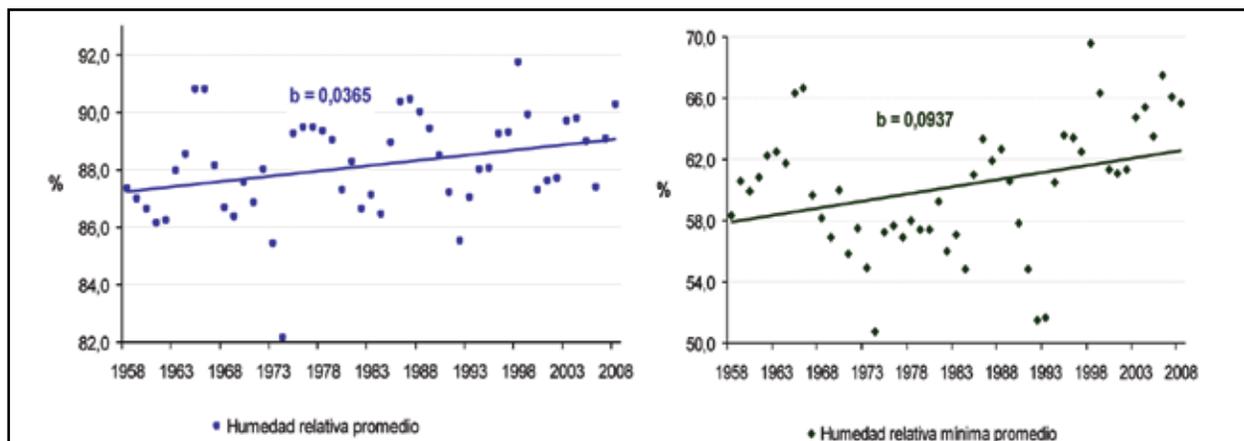


Figura 6. Humedad relativa promedio y mínima promedio anual. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1958 – 2008. 2008.

Cuadro 4. Humedad relativa mínima promedio y mínima absoluta por década. Turrialba, Costa Rica. Periodo. 1960-2008.

Periodo		1960-69	1970-79	1980-89	1990-99	2000-08
HR _{mím} prom	%	61,08 ab	56,62 b	59,12 ab	61,16 ab	64,08 a
HR _{mím} Abs		46,29 ab	41,03 c	43,92 bc	45,59 abc	49,80 a

Media en la misma fila con diferente letra, difieren significativamente ($\alpha \leq 0,05$) LSM Tukey.

En general, la humedad relativa observó un incremento en los últimos 38 años, no obstante es importante destacar el aumento de aproximadamente un 5 % anual de humedad relativa mínima, con respecto a los valores del periodo 60-69.

La distribución de la variación de la humedad relativa en los diferentes meses del año también tuvo cambios en el periodo estudiado. Se notaron incrementos significativos en los valores de humedad relativa promedio diaria para los meses de enero y mayo, solamente. Sin embargo, los valores de humedad relativa promedio mínima y mínima absoluta se incrementaron ($P \leq 0,05$) para cinco meses (enero, abril, marzo, mayo y noviembre) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Coeficientes de estimación lineal, para humedad relativa promedio mínima y mínima absoluta diaria, en los meses con incrementos anuales sostenidos. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1958-2008. 2008.

Mes	Humedad Relativa (%)			
	Promedio Mínima		Mínima Absoluta	
	m	b	m	b
Enero	0,113	-164,51	0,158	-271,75
Marzo	0,148	-236,50	0,176	-310,22
Abril	0,134	-208,05	0,113	-182,80
Mayo	0,142	-222,38	0,187	-182,8
Noviembre	0,111	-156,70	0,166	325,10

$$y = m (\text{año}) - b \quad (m, P \leq 0,05)$$

Con respecto al análisis para las variaciones de la humedad relativa, en los meses del año por décadas, no se obtuvo diferencia para la humedad relativa promedio diaria. No obstante, los valores de humedad mínima siguieron presentando incrementos para la última década, en este caso la humedad promedio mínima varió para los meses de enero, mayo, agosto, octubre, noviembre y diciembre. Mientras la humedad relativa mínima absoluta varió en los meses de: enero, marzo, mayo, junio, octubre, noviembre y diciembre como se observa en el cuadro 6.

Cuadro 6. Meses con diferencias entre periodos (décadas), para humedad relativa mínima. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1960-2008. 2008.

Variable	Humedad Relativa (%)									
	Promedio Mínima					Mínima Absoluta				
Periodo	1960-69	1970-79	1980-89	1990-99	2000-08	1960-69	1970-79	1980-89	1990-98	2000-08
Enero	61,76ab	57,01b	59,04b	58,85b	66,94a	43,90ab	37,10b	40,30b	43,40ab	47,00a
Marzo	ns	ns	ns	ns	ns	37,50ab	38,50ab	39,90ab	44,55a	44,55a
Mayo	60,13ab	55,68b	58,87ab	60,62ab	64,71a	44,00ab	42,70b	42,00b	45,80ab	52,22a
Julio	ns	ns	ns	ns	ns	51,60ab	44,40b	45,90b	48,00ab	54,67a
Agosto	62,49a	56,92b	59,86ab	60,18ab	63,99a	ns	ns	ns	ns	ns
Octubre	63,06ab	56,90b	60,76ab	58,96ab	63,71a	50,50ab	43,80b	46,60ab	48,70ab	52,78a
Noviembre	65,30ab	56,83b	62,61ab	62,81ab	68,78a	47,70ab	42,20b	46,40ab	48,30ab	53,22a
Diciembre	65,85ab	57,51b	61,58ab	62,98ab	66,92a	47,20ab	38,00b	42,90ab	44,00ab	50,33a

Medias para cada variable, en la misma fila con diferente letra, difieren significativamente ($\infty \leq 0,05$) LSM Tukey. ns = no significativa.

El incremento de los valores mínimos de la humedad relativa en buena parte del año, especialmente en los meses considerados de época seca, es de importancia en la incidencia de plagas y enfermedades, tanto de los cultivos como de las especies forestales, flora y fauna silvestres. Por lo tanto, es importante establecer los umbrales económicos de plagas y enfermedades de los cultivos de la zona, con los ajustes requeridos de los nuevos parámetros de humedad, precipitación y temperatura para adaptar las estrategias de control; además los umbrales de sobrevivencia al ataque de las especies silvestres, especialmente de las especies en vías de extinción o amenazadas, como el caso de algunos anfibios.

Radiación Solar

La energía de un ecosistema se origina en la radiación solar, por lo que se puede considerar como un factor ecológico imprescindible, ya que afecta los procesos fisiológicos de la planta, determinan la cantidad de energía capturada y la eficiencia de transformación por parte de la vegetación que la recibe. Entre los procesos fotoinducidos de la radiación están entre otros: la germinación, floración, abscisión de hojas, y en algunas plantas los estados activos y de reposo, controlado por el sistema de fotocromos. Además, controla procesos como fototropismo, y fotoperiodismo, mediante receptores de luz azul de la flavo proteínas y carotenos, de esta manera las plantas se adaptan a diferentes condiciones de calidad y cantidad de luz (Larcher 1975).

Con relación a los datos de radiación solar analizados para el periodo 1958-2008, se obtuvo un decrecimiento del promedio diario anual ($P \leq 0,0001$), como se aprecia en la Figura 7.

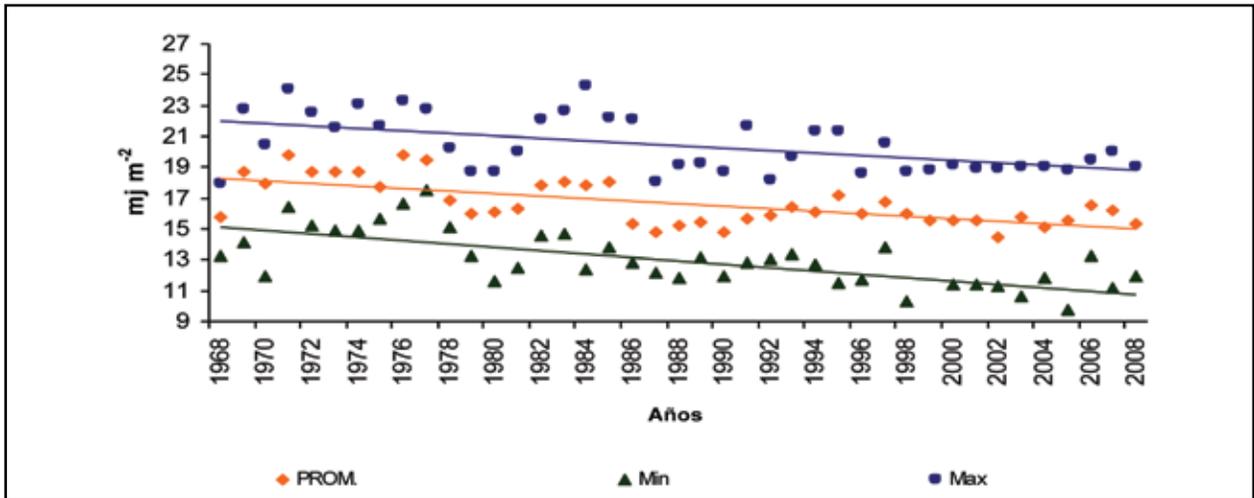


Figura 7. Radiación solar promedio, máxima y mínima promedio anual. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1968 – 2008. 2008

De acuerdo con el análisis de la variación mensual para años, el único mes que no presentó diferencias significativas, en la disminución de radiación solar fue febrero. Los mayores decrecimientos los experimentaron los meses de enero y mayo (Cuadro 7).

Cuadro 7. Coeficientes de estimación lineal, para Radiación Solar Promedio Máxima y Mínima diaria, para los once meses con decrecimientos anuales sostenidos. Turrialba. Periodo 1968-2008. 2008.

Mes	Ene	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
m	-0,112	-0,068	-0,099	-0,134	-0,066	-0,019	-0,069	-0,034	-0,091	-0,010	-0,091
b	238,08	155,04	215,04	284,87	148,65	100,85	153,28	86,89	197,09	211,44	194,92

$$y = m (\text{año}) - b \quad (m, P \leq 0,05)$$

Los valores para meses por décadas de radiación solar promedio diario refuerzan la tendencia observada anteriormente, donde ocho meses presentaron variaciones importantes ($P \leq 0,025$), como se observa en el Cuadro 8. Por lo tanto, es de suponer que un factor que ha influido en las variaciones de la eficiencia energética de las plantas que conforman los diferentes sistemas tanto naturales como agrícolas en las últimas décadas, ha sido la radiación solar.

Cuadro 8. Meses con diferencias entre periodos (décadas), para radiación solar. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1960-2008.

Radiación Solar Promedio (MJ d ⁻¹)					
Periodo	1960-69	1970-79	1980-89	1990-99	2000-08
Enero	17,60 ^a	17,70 ^a	15,49 ^a	15,00 ^{ab}	13,00 ^b
Mayo	23,30 ^{ab}	20,24 ^a	17,82 ^{ab}	16,47 ^b	16,20 ^b
Junio	17,84 ^{ab}	17,94 ^a	15,82 ^{ab}	16,12 ^{ab}	15,58 ^b
Julio	13,75 ^{ab}	16,70 ^a	15,39 ^{ab}	14,80 ^b	14,87 ^b
Octubre	17,80 ^{ab}	19,19 ^a	16,36 ^b	16,43 ^b	16,18 ^b
Noviembre	14,20 ^{ab}	16,63 ^a	14,65 ^{ab}	14,06 ^b	13,03 ^b
Diciembre	15,20 ^{ab}	16,01 ^a	13,64 ^b	12,53 ^b	13,19 ^b

Medias en la misma fila con diferente letra, difieren significativamente ($\infty \leq 0,05$) LSM Tukey.

Tomando como válido, que un decrecimiento de la radiación solar es proporcional a un incremento en la nubosidad, en regiones con una biosfera poco contaminada por gases y partículas en suspensión producto de la producción industrial como el caso de Turrialba, se puede indicar que en los últimos años hubo un incremento de la nubosidad, que no necesariamente propició más precipitación.

Por otra parte, es posible que la mayor afectación producto de la variación climática con relación a los agro-ecosistemas, sea la reducción de la radiación solar. En consecuencia los cultivos de plantas C4 como la caña de azúcar y los forrajes, pudieron tener bajas sensibles en sus producciones de biomasa.

Discusión General

Partiendo del hecho que la temperatura es el disparador de los cambios en las otras variables climáticas analizadas, se observó que a medida que los años se hicieron más calientes, la radiación solar disminuyó y la humedad relativa aumentó en forma significativa, apoyando la hipótesis de

una mayor nubosidad. La precipitación anual se incrementó en 13,50 % en los últimos 13 años con respecto al promedio histórico, y los meses que contribuyeron a ese incremento fueron enero, mayo, agosto y noviembre.

Aunque no se tuvieron datos de nubosidad en forma indirecta, este fenómeno es de importancia para explicar una disminución de la radiación solar, y el incremento de la humedad relativa (Figura 8). Las condiciones ambientales de alta humedad relativa, precipitación y temperatura hacen que la piel, mucosas, corteza, y cutícula de los seres vivos que habitan en estos ambientes experimenten un mayor grado de stress. Este efecto combinado produce una sensación denominada “temperatura de bochorno”, o índice de calor; que combina la temperatura del aire con la humedad relativa, y determina la sensación que el cuerpo humano percibe producto de la poca diferencia existente entre el sudor o la humedad de transpiración y la humedad del medio.

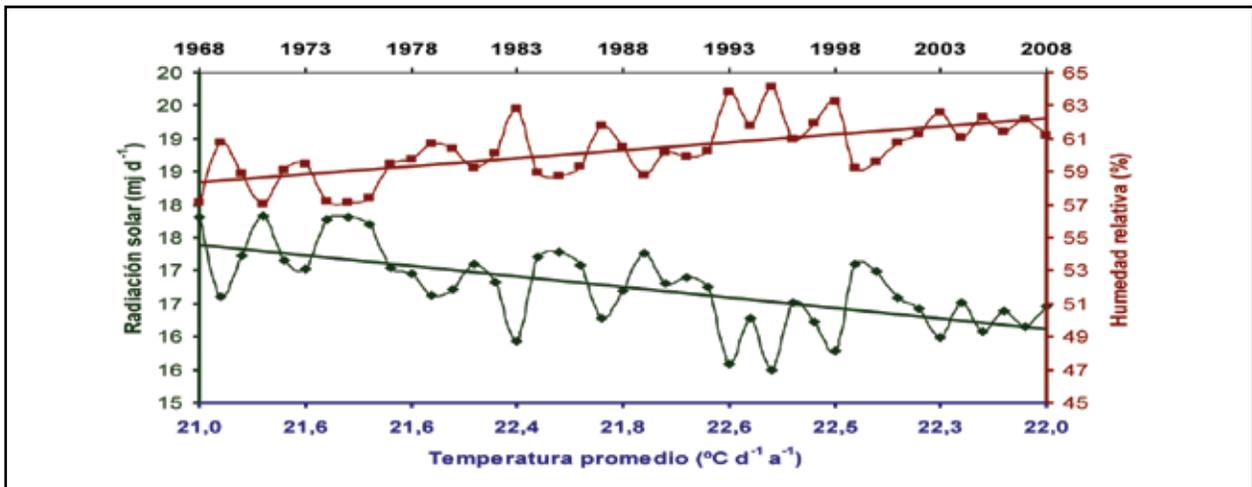


Figura 8. Variación de la radiación solar y la humedad relativa con respecto a la temperatura promedio diaria anual. Turrialba, Costa Rica. Periodo 1968 – 2008. 2008.

CONCLUSIÓN

Las tendencias en los datos de las variables climáticas analizadas, sugirieron que las condiciones de clima bajo las cuales crecieron los cultivos, la flora y fauna natural en los últimos años estudiados, fueron diferentes que 50 años atrás. Lo cual supone cambios en las interrelaciones de los seres vivos de los diferentes ecosistemas. En particular los agro-ecosistemas se podrían haber afectado, por una menor radiación solar sobre los cultivos con la consecuente reducción de la productividad neta, en términos energéticos y de producción de biomasa. Un incremento de stress hídrico causado por exceso de agua en el suelo por periodos más prolongados, y un incremento de la humedad relativa y la temperatura que favorecieron la incidencia de las plagas y enfermedades, y la competencia de malezas en los cultivos; así mismo que hace más difícil su control.

Desde el punto de vista agroecológico con los datos analizados, se pudo concluir que al final del periodo de estudio, se observaron años con un periodo seco (de menor precipitación) reducido a febrero y marzo, y, un periodo de lluvia intenso y estable. La desaparición del “veranillo de San Juan” caracterizado por una disminución de las lluvias entre los meses de julio y agosto, el incremento de la precipitación en los meses de enero y noviembre, son la principal característica de un periodo de lluvia más crudo para la agricultura, especialmente para los cultivos de ciclo corto, como el cultivo de frijol.

LITERATURA CITADA

- 1.000 p.
- Aguilar, E. A.; Tuner, D. W.; Sivasithamparam, K. 2001. Possible Mechanisms by which Hypoxia Predisposes Cavendish Banana to *Fusarium* Wilt. In *Banana Fusarium wilt Management: Towards Sustainable Cultivation. Proceeding International Workshop on Banana Fusarium wilt Disease*. Los Baños, Filipinas. INIBAP-ASPNET. p: 282-290.
- Burdon, J. J.; Thrall, P. H.; Ericsson, L. 2006. The current and future dynamics of disease in plant communities. *Annual Review of Phytopathology*. 44: 19-39.
- Casasola, F. R. 1998. Efecto de la humedad del suelo sobre la anatomía y morfología de cuatro introducciones de *Brachiaria spp.* Tesis. Presentada ante la Universidad de Costa Rica para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agronómica con Énfasis en Zootécnica. 34 p.
- Cerri, C.; Sparovek, G.; Bernoux, M.; Easterling, W.; Melillo, M.; Clemente, C. 2007. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. *Science Agriculture*. (Piracicaba, Braz.), 64 (1): 83-99.
- Easterling, W.E.; Apps, M. 2005. Assessing the Consequences of Climate Change for food and forest resources: a view from the IPCC, climatic change. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria*. 70: 165-189.
- Holdridge, L. 1978. *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Internacional de Cooperación Agrícola. San José, Costa Rica. 261 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate change: impacts, adaptation & vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. Kanagawa. 675 p.
- Ewel, J. J. 1971. Experiments in arresting succession with cutting and herbicides in five tropical environments. Thesis Ph, D. Department of Botany, University of North Carolina, Chapel Hill, USA. 248 p.
- Larcher, W. 2003. *Physiological Plant Ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. 4ta ed. New York, USA. 513 p.
- Loomis, R. S.; Connor, D. J. 2002. *Ecología de los cultivos: productividad y manejo en sistemas agrarios*. Mundi-Prensa. México. 591 p.
- MAG-UCR (Ministerio de Agricultura y Ganadería – Universidad de Costa Rica). 2005. Informe sobre la evaluación productiva de las fincas del proyecto de reconversión productiva. (ASOPROA). Santa Cruz de Turrialba, Cartago, Costa Rica. 42 p.
- Mazza, P., Roth, R. 1999. Global warming is here: the scientific evidence. *Earth Island Journal*. 14(3): 14.
- NASA (National, Aeronautics and Space Administration). 2005. *Global temperature trends: 2005 summation*. (en línea). USA. Consultado: 16 abril 2009. Disponible en: Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio. <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/2005/>.
- Odum, E., Barret, G. 2006. *Fundamentos de Ecología*. 5ta ed. Thomsom, México D.F., México. 589 p.
- Power, H. C.; Mills, D. M. 2005. Solar radiation climate change over Southern Africa and an assessment of the radiative impact of volcanic eruptions.

International Journal Climatology 25:
295–318.

- Romero, R. 2001. Respiración. *In*: Fisiología de la Producción de Cultivos Tropicales. (Fascículo 1. Procesos Fisiológicos Básicos). Villalobos Rodríguez, Enrique. Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica. p: 55-80.
- Shibles, R.; Villalobos, E. 2001. Fotosíntesis. *In*: Fisiología de la Producción de Cultivos Tropicales. (Fascículo 1. Procesos Fisiológicos Básicos). Villalobos Rodríguez, Enrique. Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica. p: 15-51.
- Silva, A. L.; Roveratti, R.; Reichart; K.; Bacchi, O.O.S.; Timm, L. C.; Bruno, I. P.; Oliveira, J. C. M.; Dourado Neto, D. 2006. Variability of water balance components in a coffee crop in Brazil. *Scientia Agricola* 63: 105-114.
- Villalobos, E. 2001. Fisiología de la Producción de Cultivos Tropicales (Fascículo 1. Procesos Fisiológicos Básicos). Villalobos Rodríguez, Enrique. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 228 p.

