INCO-CT2004-510739

EPIC-FORCE

Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt

Instrument: Specific Targeted Research Project

Thematic Priority: Specific Measures in Support of International Cooperation, Developing Countries, A.2 Rational Use of Natural Resources, A.2.1. Managing humid and semi-humid ecosystems

Deliverable 15

FLOOD RESPONSE ANALYSIS FOR PEJIBAYE WATERSHED, COSTA RICA

Jorge Fallas and Carmen Valverde
Universidad Nacional, Costa Rica

Start date of project: 1 February 2005 Duration: 36 months

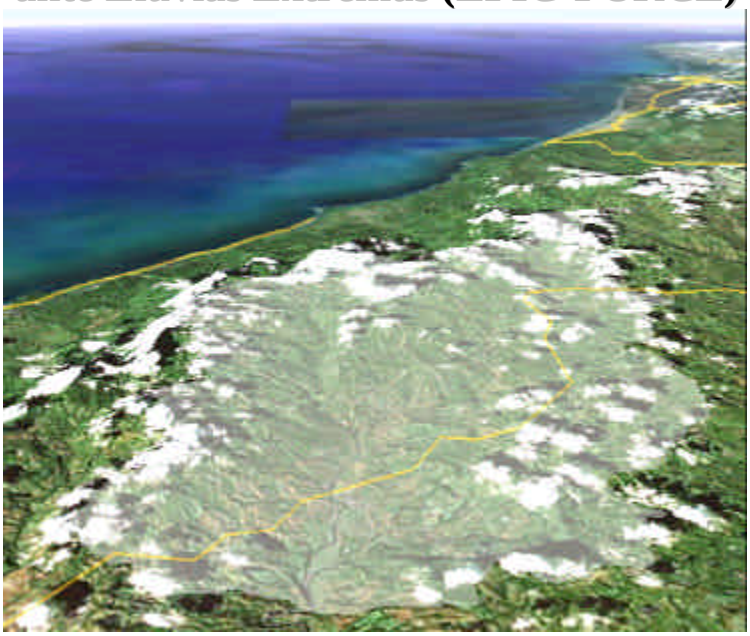
Organization name of lead contractor for this deliverable: Universidad Nacional, Costa Rica

Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006)

Dissemination Level

PU	Public	**X**
PP	Restricted to other programme participants (including de Commission Services)	
RE	Restricted to a group specified by the consortium (including de Commission Services)	
CO	Confidential, only for members of the consortium (including de Commission Services)	

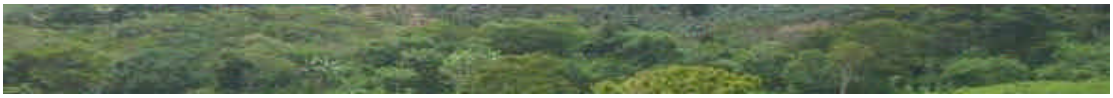
Políticas para el Control Integrado de Cuencas Forestadas ante Lluvias Extremas (EPIC-FORCE)



Bosques y eventos hidrometeorológicos extremos en Costa Rica: Datos y evidencia científica para la formulación de políticas en gestión de cuencas

Jorge Fallas jfallas@racsa.co.cr
Carmen Valverde ginette.valverde@gmail.com

2007



EXECUTIVE SUMMARY

Costa Rica is located at the extreme south tip of Central America and has a wet to very wet tropical climate. The terrain is rugged and composed of a series of interconnected, high mountain ranges that in some places reach more than 4,800 masl and extend about 370 km from northwest to southeast Mountainous account for almost three-quarters of the country. The combined influence of climate, topography, and human activities means that floods often take place in the country.

Annual rainfall ranges from 1200 mm in the northwest of the country to more than 8000 mm at middle elevations in the Talamanca mountain range. The Caribbean basins have no dry season while the Pacific basins present a dry season between the end of November and the first days of April. The wettest months on the Pacific slopes are September and October with about 300 to 600 mm whilst in the Caribbean the maximums are reach in July, November and December with about 350 to 400 mm per month. The country comes under the indirect influence of tropical cyclones such as hurricanes and tropical depressions resulting in flooding between July and October in the Pacific slopes and in November-December-January in the Caribbean lowlands. Typical examples are the floods associated to hurricanes Fox (Oct-1952, cat-4), Hazel (Oct-1954, cat-4), Cleo (Set-1964, cat-4), Gilbert (Set-1988, cat-5), Joan (Oct-1988, cat-4), Opal (Oct-1995, cat-4), Cesar (July-27, 1996), Tropical depression Gert (September-15, 1993) and Mitch (27-29 Oct-1998, cat4).

Runoff is the main source of water; about 154 Km^3 of rain fall down the 35 major watersheds of the country. There is very wet belt between 1500 and 2000 masl, which is orographic in nature and may contribute to floods during the rainy season.

Superficial landslides are frequent due to abundant precipitation on steep topography, especially in roads and agricultural fields. These landslides create temporary dams across river courses and, in a few cases, have resulted in large floods. Costa Rica prone flood areas are located especially in the urban areas of the Central Valley and in the lowland of the Caribbean Coast; these events are caused mainly by long and intense storms during the wet season.

Floods cause severe damage to infrastructure, erosion and landslides leading to millions of dollars in economic loss. Weak law enforcement and the presence of climate disturbances such as cold fronts, tropical depressions and hurricanes had imposed a heavy toll on the economy of the country. The slowly degradation of the environment and localized accelerated soil erosion aggravate floods, and the consequent damage to infrastructure, agricultural fields, housing, and water supply systems in the lower flood plains.

Floods at National level

This section of the report summarized the frequency, trends, impacts and spatial distribution of flood events registered between 1970 and 2004 in Costa Rica. The study of floods and its relation to forest cover (or deforestation) has become a focal issues in the field of flood control and hazard reduction around the world. In recent years, Costa Rica policy-makers and planners have showed an interest in looking into the challengers of flood management and prevention. Linking disaster management to the economy and development of the country has been a positive trend in recent years. The new vision of the government emphasises the management of

the whole disaster cycle, given importance to technical aspects of disaster management as well as to prevention activities.

In the lowlands of Costa Rica, riverine flooding is a common feature and the people get use to such events. For example, in January 2001 severe floods occurred in the northeastern region of Costa Rica. This part of the country experienced nearly 1.5 times the normal monthly rainfall, which caused widespread damage to standing crops as well as to bridges and roads. For the purpose of mitigation both structural and non-structural measures have been undertaken.

During the 34-year period studied (1970 to 2004), at least 3146 floods occurred in Costa Rica. However, most floods take place in limited areas and losses are recurrent. About 33.5% took place in the Gran Metropolitan Area (Central Valley) and another 26.4% in the lowlands of the Caribbean coast. Severe floods may occur on average once in 50 to 70 years and are usually associated to Tropical depressions and/or hurricanes.

Most of the floods occur during the wet season, particularly when heavy and or prolonged precipitation falls over already saturated soils. The data available for the last 34 year on magnitude of damage, human and economic loss points out to an increase in both, the number of floods and their impacts. The impacts mainly consists of damage to building, bridges, roads, riverbank erosion and sedimentation of rivers and reservoirs, destruction of agricultural fields, and displacement of the affected population.

Matina watershed

To look at the relationship between forest and floods, a more detailed analysis was carried out in the Matina river basin located in the Caribbean slopes between 1970-2004. The pattern documented at national was also present on this basin, even though the watershed maintained its forest cover between 80 and 90% during the study period. The study shows that the forest, maintains the natural hydrological behaviour of the catchment, however, by itself cannot eliminate the vulnerability of people and infrastructure located in the riverbanks or in the flood plain. The beneficial effect of the forest is minimum in the presence of extreme rainfall associated to long periods of precipitation or to climatic events such as tropical cyclones.

Pejibaye watershed

An analysis was carried out to investigate the relationship between ENOS an annual and maximum 24hr precipitation in Bolivia station (No, No.98011, 740 msnm, Pejibaye waterbasin, South Pacific, Costa Rica) between 1969 and 2005. The Generalized Extreme Value distribution (GEV) was fitted to the data to estimate maximum 24hr rainfall events with return periods between 1 and 200 years. Annual average precipitation during Niño years was 1909±332 mm, whereas during Niña years was 2583±365 mm; and for neutral years was 2231 ±470 mm ((Mann-Whitney, $P< 0.05$). The warm phase of ENOS tends to generate years with lower maximum precipitation in 24hr (Medium 91.1mm) compared to Niña or neutral years (medium 122 mm and 108 mm, respectively); nevertheless the differences were not significant (Kruskal-Wallis, $P> 0.1$). The increase in annual precipitation during La Nina does not seem to have any impact in return periods of daily maximum rainfall. The frequency by episode of ENOS for return periods of 2, 5, 10 and 50 years indicates that neither the cold nor the warm phase exert a significant influence in the maximum precipitations in 24 hours (Chi-square; $P> 0.1$). In

general, Niño years tend to generate events with return periods of 5 or less years (maximum 141mm per day) whereas neutral and Niña years are characterized by events with return periods between 5 and 10 years (up to 180 mm per day). The station registered three extreme events, one in 1988, hurricane Juana with 253,4 mm (Niña), another in 1993 (331.5 mm, Tropical Depression Gert, Neutral) and the third one in 1996 (364,1 mm, hurricane Caesar, Neutral). If these events were caused by normal climatic conditions, its return period would have been more than 150 years. The average precipitation Maxima in 24 hours shows a high correlation with the Oceanic Niño Index (ONI) of region 3.4 for April, July, September and October. The effect of La Niña in maximum precipitations in 24hr is accentuated, as the deviations of the temperature Niño zone 3.4 gets greater. If we were to have more severe Niña years we could expect larger 24 hr maximum events in the Pejibaye river basin and a possible increased in either the frequency o severity of floods. On the other hand, if the future were more like Niño years, we could expect a reduction in 24hr maximum precipitation and a possible reduction in maximum discharge and floods.

Finally, for the Pejibaye watershed (South Pacific, Costa Rica) the relationship between ENOS, land-use-land-cover, instantaneous and maximum discharge in 24, 48, 72hr was studied between 1975 and 1995. Average annual discharge for Niño years was 965±160 mm, whereas during Niña years increased to 1905 ±560 mm and for non-ENSO years was 1442±455 mm. The differences were statistically significant (Mann-Whitney, $P< 0.05$). Niña years tend to generate more annual discharge than Niño and non-ENSO years (Fisher LSD, $P<0.03$). No significant differences were found in maximum discharge for 24hr, 48hr and 72 hr for ENSO episode. Maximum discharge in 24, 48 and 72hr showed a positive correlation with the Oceanic Niño Index (ONI, Niño3.4) of August, September and October. The relationship is less consistent for Niña and neutral years; nevertheless the tendency indicates that there is a greater probability of an increase in discharge during Niña years. The frequency of events by ENOS and for return periods of 2, 5, 10 and 20 years indicates that neither the cold nor the warm phase seem to exert a significant influence in maximum discharge in 24 hours (Chi-square; $P> 0,11$). In general, Niño years tend to be associated with events of 2 o less years return period (maximum 38 mm/24hr) whereas events during neutral and Niña years tend to have return periods between 5 to 10 years (38 to 76 mm/24hr). Maximum discharge in 48 and 72hr showed a similar behaviour. The station registered two extreme discharge events, one in 1973 (maximum water level 4.3m) associated to Hurricane Juana and another in 1993 (maximum water level 5,46 m) associated to Tropical Depression Gert; the return period of these events was estimated above 150 years. The hurricane destroyed the gaging station in 1996 and therefore there is no data on water level for this event; nevertheless judging by the 1993 event, it was stronger. Between 1970 and 2000 forest cover on the river basin changed from 20 to 3% and pasture land, the dominant land use of the watershed, was replaced by coffee plantations beginning in the early 80s; reaching 21% of total area in 2005. Coffee seems to exert a positive regulating function under normal rain conditions since floods in the river basin in recent dates have not been registered.

Policy and management implications

Historical records indicate that the frequency of floods has increased since 1970, apparently due to poorly planning, increased numbers of people exposed to floods and inadequate land use management practices. There must be several more events prior to 1970, however they have not been documented due to poor data collection systems and/or remoteness of the places in which

such events took place. Details on recorded events often do not provide the data required to fully access the impact of the event. It is, therefore, important to improve the database related to floods, including the use of geographic information system (GIS), this tool would improve the disaster database considerably and facilitate effective and easy data manipulation and visualisation.

Disaster management issues involve integration of education, prevention and mitigation measures into overall development planning and activities, preparedness plans, and related warning messages. In Costa Rica there is formal mechanisms do deal with disasters associated with floods; responses have been adequate whenever disasters have occurred. Organisations at the national, regional and district level have responded in a timely manner during disasters.

Global change scenarios indicates that this region may have more El Niño-like years in the future and as a consequence we may experience a reduction in hurricanes and other tropical cyclones, which in term may bring less catastrophic riverine and flash floods. However to be prepare for the climate of the next century we need more data, the increase in the number of hydro-meteorological stations at some watersheds by the Ministry of Energy and Environment (MINAE) would provide the data needed to both study the phenomena and to make predictions as part of an early warning system. Other measures that may contribute to a reduction in normal flood risks include the regeneration of degraded rangelands, the implementation of watershed-wide management plans, and specially the relocation of houses and buildings in flood prone areas.

ÍNDICE GENERAL

EXECUTIVE SUMMARY i

Introducción: Descripción del proyecto 1
Enfoques del proyecto 2
Modelado hidrológico 3
Análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos lluviosos extremos 3
Costa Rica: su clima e hidrología 10
Vientos en Costa Rica 11

Regionalización hidroclimática de Costa Rica 12
Vertiente Pacífica 12
Vertiente Norte 16
Vertiente Caribe 17
Precipitación y escorrentía en Costa Rica: patrón espacial 18

Inundaciones en Costa Rica y estudio de caso en una cuenca forestada del Caribe Costarricense: Evidencia de los últimos 34 años 22

Aplicación de ENOS como indicador de cambios en la precipitación máxima diaria en la cuenca del río Pejibaye y su impacto en inundaciones 46

Análisis de descargas máximas en 24, 48,72 horas e instantáneas y su relación con ENOS, ciclones tropicales y uso-cobertura de la tierra en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica. 77

Anexo1: Intensas lluvias e inundaciones en Costa Rica. 120

Anexo 2: Inundaciones en imágenes 121

Anexo 3: Ubicación de la Región Niño 3.4 con respecto a Centro América 123

Anexo 4: La cuenca de Pejibaye en imágenes 123

Introducción: Descripción del proyecto

Los eventos hidroclimáticos extremos (Ej. precipitaciones intensas y prolongadas, sequías y avenidas extraordinarias) son parte del comportamiento natural del clima; sin embargo en las últimas tres décadas han recibido gran atención por parte de la población, la prensa y los gobiernos por los efectos devastadores que ocasiona en el paisaje, los ecosistemas, las personas, sus bienes y en la economía local y nacional (Costa Rica. sf.; Clarke and Rendell, 2006; Karl and Easterling,1999; Guha-Sapir, Hargitt and Hoyois, 2004; Khanal, Shrestha, and Ghimire, 2007; Xu, et.al., 2006; Wardlaw, Hulme, and Stuck, 1996). Un evento climático extremo es aquel que tiene una baja frecuencia de ocurrencia en el tiempo en una localidad particular y por tanto entre uno y otro evento existen muchos años; sin embargo cuando ocurre causa un impacto severo en la naturaleza y/o en los bienes y servicios utilizados por los humanos (IPCC,2001)

Las crecidas extraordinarias (aumento inusual en el nivel del agua en el cauce) forman parte del comportamiento natural del sistema hidrográfico de la cuenca y son el resultado de la combinación de condiciones de alta humedad en el suelo de la cuenca y lluvias abundantes y de larga duración asociadas a fenómenos climáticos tales como los frentes fríos, depresiones tropicales y en especial huracanes. Dichos eventos en presencia de personas, bienes o infraestructura vulnerable se convierten en un desastre, el cual a su vez ocasiona una emergencia que se traduce en pérdida de vidas, bienes e infraestructura.

Las lluvias extremas y las avenidas que las acompañan forman parte de los procesos naturales de la cuenca; sin embargo en los últimos años han recibido mayor atención por parte de la academia[1], los medios de comunicación (locales, regionales [2] y mundiales[4]) y los políticos debido a los impactos devastadores que han ocasionado en la población y en las economías nacionales[3]. Con frecuencia, la prensa, los grupos ambientalistas y los políticos asocian dichos eventos con la deforestación (legal e ilegal), la explotación de bosques[4] y el cambio climático. Sin embargo, a pesar del interés generalizado en el tema, existe poca y aún conflictiva evidencia científica sobre la magnitud e impacto adverso que ocasiona la remoción y el posterior cambio de uso de la tierra en la cuenca en presencia de lluvias extremas y de diversos escenarios de cambio climático.

La investigación hidrológica realizada hasta la fecha indica que en aquellas cuencas donde el bosque es la vegetación original, este provee la mejor regulación hidrológica natural. Sin embargo, cuando el bosque es reemplazado por otras coberturas y usos del suelo (Ej. pasto, cultivos permanentes, cultivos anuales, uso residencial), existen otros aspectos tales como la geología, las propiedades del suelo (Ej. conductividad hidráulica, presencia de capas impermeables, profundidad), el contenido de humedad del suelo previo al evento y el porcentaje de área impermeable que deben considerarse al explicar el cambio en la magnitud de variables hidrológicas tales como las descargas máximas diarias y en especial las descartas instantáneas en la cuenca (Bruijnzeel, 2004). En la ultima década se ha observado un aumento en los impactos asociados a inundaciones (ver sección 2); sin embargo no existe evidencia de que dicho aumento esté asociado a un incremento en la magnitud de los eventos hidroclimáticos que los ocasionan. Con frecuencia el aumento en el número de sitios afectados, número de damnificados y viviendas afectas y en general el incremento en las perdidas económicas son el

resultado de ausencia de planificación territorial la cual se traduce en ocupación de las planicies de inundación y las riberas de los ríos [5].

El tema aumenta en complejidad si consideramos los efectos y sinergias de fenómenos climáticos globales tales como El Niño Oscilación Sur (ENOS)[6], la oscilación decadal[7], el calentamiento global, el cambio climático[8] (Yunling, and Yiping, 2005) y la presencia de disturbios tropicales (Ej. depresiones tropicales, huracanes). El estudio de la interacción bosque-lluvias extremas a nivel de la cuenca hidrográfica es otro tema complejo pues intervienen una serie de factores tales como su tamaño, las condiciones climatológicas locales y globales, la duración, extensión e intensidad de la tormenta, la topografía, la geología (en especial la presencia de acuíferos), el uso-cobertura de la tierra, las practicas agrícolas, los suelos y en especial su contenido de humedad previo al evento extremo.

Para dar respuesta a los interrogantes anteriores y proveer evidencia científica sobre los procesos e interacciones asociados a los bosques y los eventos extremos se ejecutó el proyecto "EPIC FORCE: Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt" 9, el cual fue financiado por el 6º Programa Marco para la Cooperación Internacional (INCO) de la Unión Europea[10]. El proyecto es un esfuerzo internacional que busca integrar la investigación científica y su aplicación a la gestión de cuencas y a la formulación de políticas regionales, nacionales e internacionales. En el proyecto participan investigadores del la Universidad Nacional, Costa Rica (www.cinpe.una.ac.cr), Universidad de Newcastle upon Tyne, UK (http://www.ncl.ac.uk/external.phtml), Università degli Studi di Padova, Italia (http://www.tesaf.unipd.it/epicforce), Universidad de Cuenca, Ecuador (http://promas.ucuenca.edu.ec/promasweb/Presentacion/promas.html), Universidad Politécnica de Madrid, España (http://www.montes.upm.es), Universidad Austral de Chile (http://www.uach.cl/externos/epicforce), Universidad Nacional de la Plata, Argentina (http://www.ing.unlp.edu.ar/ecohidrologia/home.htm) y el Ministerio de la Producción, Subsecretaria de Recursos Naturales Provincia de Tierra del Fuego, Antártica e Islas del Atlántico Sur (http://www.tierradelfuego.gov.ar/secprom).

El objetivo del proyecto es generar un marco teórico y metodológico para el análisis de los eventos lluviosos extremos y sus impactos económicos, sociales y ambientales a nivel local, nacional e internacional. En el caso de Costa Rica, la investigación enfatiza la respuesta de la cuenca hidrográfica ante lluvias extremas como las asociados a los efectos indirectos de los huracanes y las depresiones tropicales. Se espera que los resultados motiven a los gobiernos locales y nacionales a formular políticas que utilicen la cuenca hidrográfica como unidad de gestión territorial.

Enfoques del proyecto

En los países en vías de desarrollo, incluido Costa Rica, existen escasos registros confiables sobre la severidad e impacto de los eventos extremos (Guha-Sapir and Below, 2002; Khanal, Shrestha, and Ghimire, 2007). Por otro lado tampoco existen series hidroclimáticos de largo plazo; en el mejor de los casos pueden encontrarse estaciones meteorológicas y limnimétricas con registros de 30 años. Otro factor limitante es que las lluvias ocasionadas por eventos tales como los huracanes con frecuencia destruyen las estaciones medidoras de caudales y por tanto no se tiene certeza del volumen de agua y sedimentos transportados por el cauce. Por estas

razones en el proyecto EPIC-FORCE se implementaron dos estrategias de investigación; la primera se sustenta en la simulación hidrológica y la segunda en el análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca ante los eventos extremos.

Modelado hidrológico

El modelado hidrológico fue realizado por la Universidad de Newcastle upon Tyne utilizando el programa SHETRAN[11] (Fig. 1). Los datos descarga diaria para la estación limnigráfica Pejibaye (No. 93-31-10) fueron suministrados por el Instituto Costarricense de Electricidad. El equipo de trabajo costarricense escaneo y digitó las bandas pluviográficas de la estación Bolivia (No.98011, 1969-2005) con el objeto de contar con datos horarios para la simulación. La cuenca del río Pejibaye (subcuenca del río Grande de Térraba) cuenta con un registro hidroclimático de al menos 25 años y fue impactada indirectamente por las lluvias del huracán César en julio de 1996. El objetivo de la simulación fue investigar la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos extremos bajo diferentes porcentajes de cobertura forestal (Birkinshaw and Bathurst, 2007).

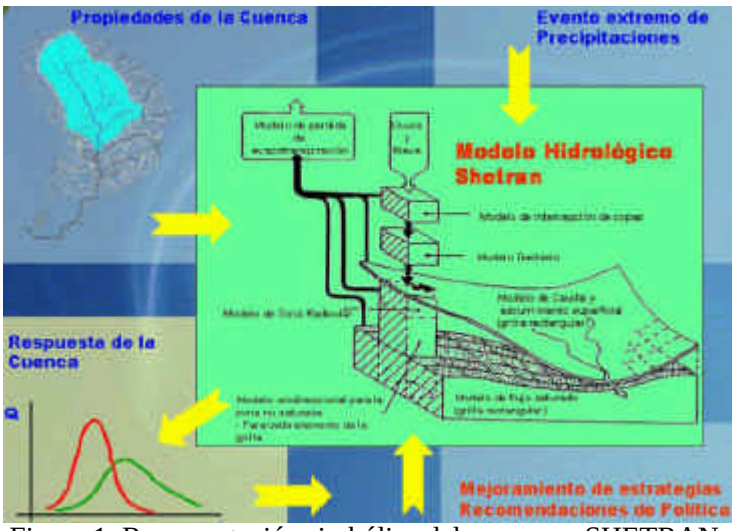


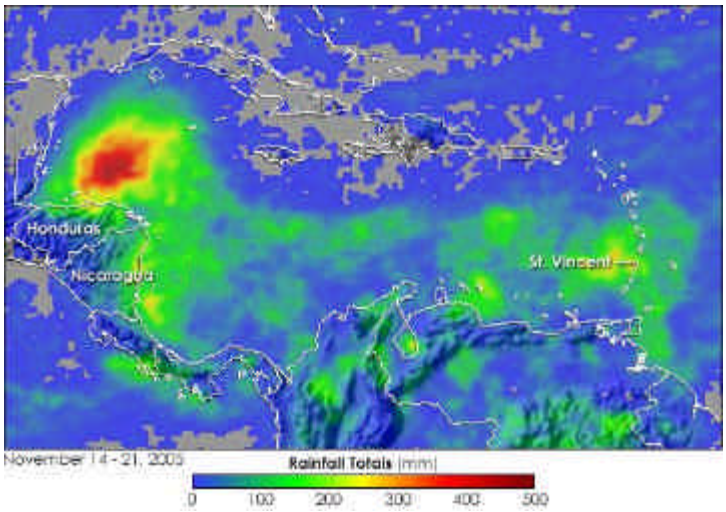
Figura 1: Representación simbólica del programa SHETRAN.

Análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos lluviosos extremos

El área de la cuenca es uno de los elementos relevante en el estudio de la relación bosque-eventos hidrometeorológicos extremos. Por ejemplo, es un muy posible que remover el bosque en una cuenca pequeña (Ej. 10 hectáreas) ocasionará un incremento significativo en la descarga de pico o instantánea de la cuenca; sin embargo dicho efecto pasaría desapercibido en una cuenca de cientos de kilómetros cuadrados (Bruijnzeel, 2004). Por otro lado, debido a la complejidad del programa SHETRAN no es posible simular con una alta resolución espacial la respuesta hidrológica de una cuenca de dicho tamaño.

Para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca en el periodo analizado se realizaron las siguientes tareas:

1. Análisis de la distribución y frecuencia de inundaciones en Costa Rica entre 1970 y 2004.
2. Análisis de la tendencia en frecuencia y número de afectados por inundaciones en la cuenca del río Matina entre 1970 y 2004 (cuenca con más de 80% de cobertura forestal).
3. Elaboración de mapas de uso-cobertura para los años 1948 y 1961 utilizando fotos aéreas en blanco y negro. Los mapas de los años 2000 y 2005 provienen del trabajo de Sánchez et. al. (2006).
4. Compilación de datos edafológicos a escala 1:200.000 para la cuenca (Acón y asociados, 1991). Dichos mapas se complementaron con visitas a la cuenca en los años 2005 y 2006.
5. Análisis del comportamiento de la precipitación anual, decadal y máxima anual en 24 horas para la estación Bolivia (No.98011, 1969-2005) ubicada a 740 msm en la parte central de la cuenca del río Pejibaye. El objetivo del análisis fue determinar si existió algún cambio en el patrón anual de precipitación en la estación. Para la serie máxima anual se ajustó un distribución de valor extremo (Pilon and Harvy, 2001) y posteriormente se determinó la lluvia esperada para periodos de retorno entre 1 y 200 años.
6. Análisis de la relación entre la precipitación (anual y máxima) y los episodios de El Niño Oscilación Sur (ENOS), el cual tiene un fuente impacto en la cantidad y distribución de la precipitación a nivel mundial.
7. Análisis del comportamiento de la descarga anual y máxima anual en 24, 48 y 72 horas e instantánea para la estación Pejibaye (No. 93-31-10, 1971-1996[12]). Para cada una de las series máximas anuales se ajustó un distribución de valor extremo (Pilon and Harvy, 2001) y posteriormente se determinó la descarga esperada para periodos de retorno entre 1 y 200 años. Una vez analizados los patrones de lluvia y descarga y su interrelación se procedió a determinar si existía algún cambio en la magnitud de las mismas asociadas a cambios en el uso-cobertura de la tierra en la cuenca.
8. La evidencia obtenida a partir del análisis anterior aunada a los resultados de programa de simulación se utilizaron como base para la formulación de políticas.



Tormenta Tropical Gama. Noviembre 21, 2005. Causó inundaciones y deslizamientos en la costa norte de Honduras. 11600 personas evacuadas, al menos 32 muertos. Imagen Satélite Misión Medición Precipitación Tropical (TRMM).

Fuente: http://veimages.gsfc.nasa.gov/17374/gammarain_TRM_2005325.jpg

Obsérvese que en Costa Rica la mayor cantidad de precipitación se muestra en el Caribe Norte y en la Península de Osa.

Referencias

Acón y asociados, 1991. Manual descriptivo de la leyenda del mapa de asociaciones de subgrupos de suelos de Costa Rica Escala 1:200.000. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. San José, Costa Rica.

Birkinshaw, S.J. and Bathurst, J.C. 2007. Model Analysis of Land-use Impact on Flood Response for the EPICFORCE Focus Areas. University of Newcastle upon Tyne, UK.

Bruijnzeel, L. A. 1990. Hydrology of tropical moist forest and effects of conversión: A state of knowledge review. UNESCO, Paris, and Vrije Universiteit, Amsterdam.

Bruijnzeel, L. A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems and Environment. 104:185-228.

Clarke, M. L. and Rendell, H. M. 2006. Hindcasting extreme events: the occurrence and expression of damaging floods and landslides in Southern Italy. Land Degradation & Development VoL: 17: NO: 4: 365-380. 2006

Costa Rica. sf. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). Impacto directo de los desastres naturales declarados en Costa Rica: 1988-2001. Sistema de Indicadores sobre Desarrollo Sostenible (SIDES).
http://www.mideplan.go.cr/sides/ambiental/32-1.htm

IPCC. 2001. Climate Change 2001:Working Group I: The Scientific Basis. Appendix I - Glossary. p.790. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/pdf/TAR-APPENDICES.PD

Karl T R, Easterling DR.1999. Climate extremes: selected review and future research directions. Clim Change 42: 309–325.

Guha-Sapir., D. Hargitt, D. Hoyois, Ph. 2004. Thirthy years of natural disasters 1974-2003: The numbers, Presses Universitaires de Louvain: Louvain-la Neuve. [ID n202] http://www.em-dat.net/publications.htm

Guha-Sapir D., Below R. 2002. Quality and accuracy of disaster data: A comparative analyse of 3 global data sets. Working paper prepared for the Disaster Management facility, World Bank, Brussels CRED, 2002. http://www.em-dat.net/publications.htm

Khanal, N. R., Shrestha, M and Ghimire, M. L. 2007. Preparing for Flood Disaster: Mapping and Assessing Hazard in the Ratu Watershed, Nepal . The International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD).
http://books.icimod.org/index.php/downloads/publication/134

Jones, P. D. and Mann, M.E. 2004. Climate Over Past Millennia. Reviews of Geophysics, Vol. 42, No. 2, RG2002, 6 May 2004.

Pilon, P. J. and Harvy, K. D. 2001. Consolidated Frequency Analysis (CFA) versión 3.1. Reference manual. Environmental Canada. Ottawa, Ontario, Canada. 1993. 91p. + anexos. Disponible en http://www.trentu.ca/academic/wsc/software.shtml

Sánchez, et. al., 2006. Estudio de Monitoreo de Cobertura Forestal de Costa Rica 2005. I. Parte: Clasificación de la Cobertura Forestal con Imágenes Landsat ETM+ 2005. Proyecto ECOMERCADOS, Fondos Gef – Ecomercados. Convenio De Donación Tf 023681. 37p.

Wardlaw, R. B. ; Hulme, M; and Stuck Y.1996. Modelling the Impacts of Climatic Change on Water Resources Water and Environment Journal 10 (5), 355–364.

Xu, J.et. al. (Eds).2006. Managing Flash Floods and Sustainable Development in the Himalayas. Report of in International Workshop held in Lhasa, PRC, October 23-28, 20005. The International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD). 2006. http://books.icimod.org/index.php/downloads/publication/22

Yunling, He and Yiping, Zhang. 2005. Climate Change from 1960 to 2000 in the Lancang River Valley, China. Mountain Research and Development Vol 25 No 4 Nov 2005: 341–348

---

[1] http://www.math.uu.se/research/pub/Ryden1.pdf, www.aoml.noaa.gov/hrd/project97/cl_proj2.html

[2] El Estado de la Nación 2004 pág. 213. http://www.estadonacion.or.cr/

Lluvias causan daños en carreteras por 33 millones de dólares. Lunes 24 de octubre, 2005 [09:56:00] hora de Costa Rica. Las lluvias que han afectado a Costa Rica en los últimos dos meses han causado los peores daños a la red de carreteras en los últimos 30 años por valor de unos 33 millones de dólares, informó hoy una fuente oficial. http://www.nacion.com/ln_ee/2005/octubre/24/ultima-ce19.html

La Reducción de riesgos de desastres: Un desafío para el desarrollo http://www.sld.cu/sitios/desastres/temas.php?idv=2234

Menos bosques, más inundaciones. El precio de la tala es muerte y destrucción. Quírico Jiménez M. Diputado. "a mediados del año 2002 hubo una iniciativa del MINAE para vedar el aprovechamiento forestal en las zonas con pendientes superiores al 40% en toda la zona de Limón, por una recomendación de la Comisión Nacional de Emergencia, y así aminorar el catastrófico resultado de las inundaciones y para proteger las fuentes de agua de muchas comunidades" http://www.nacion.com/ln_ee/2005/enero/17/opinion5.html

Informe regional publicado ayer. Prevén invierno irregular en istmo Exceso de lluvia en Pacífico tico, menos en Caribe. ACAN-EFE y Redacción. Tegucigalpa.
"Es conveniente que Centroamérica tenga mecanismos de prevención para que la gente del campo sufra menos" por el cambio climático, dijo el delegado local del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Guillermo Villanueva. "Cuando existe poca protección del bosque las lluvias arrasan con todo, y eso es lo que hace más vulnerables a nuestros países en América Latina", declaró.
http://www.nacion.com/ln_ee/2003/abril/20/mundo6.html

Hondureños que clamaban por agua ahora se quejan por abundancia de lluvia. Agencia ACAN-EFE. Miércoles 12 de junio, 2002 10:41:00 (Hora local).
"A los daños que Honduras sufre por los fenómenos naturales, se suma la destrucción masiva del bosque, del que se pierden entre 80.000 y 120.000 hectáreas cada año, según fuentes oficiales". "Dirigentes de organizaciones ecologistas coinciden en señalar que los hondureños están pagando el daño que le han causado al bosque en los últimos 30 años." http://www.nacion.com/ln_ee/2002/junio/12/ultima4.html.

Defensa civil de Nicaragua vigila ríos del Caribe ante eventuales inundaciones. Agencia ACAN-EFE. Lunes 13 de agosto, 2001 11:35:00 (Hora local).
”El mayor Omar García, oficial de la Defensa Civil, dijo hoy a ACAN-EFE que con el paso de una onda tropical el cauce de los ríos Coco, fronterizo con Honduras, Prinzapolka, Bambana y El Rama, en el Caribe nicaragüense, han aumentado de nivel debido a las intensas lluvias. Según el oficial, el bosque tropical húmedo de la zona reduce la absorción del agua durante el período de lluvias (mayo a octubre), y permite con facilidad el crecimiento de los ríos y las posteriores inundaciones de las comunidades indígenas. http://www.nacion.com/ln_ee/2001/agosto/13/ultima6.html

Istmo se quedará sin bosques en 15 años. Natura grita agobiada. ACAN-EFE.
La coordinadora del programa, la nicaragüense Teresa Zúñiga, afirmó que la devastación que el huracán Mitch causó en Centroamérica en 1998 es "una de las lecciones" sobre las consecuencias de la deforestación. Los expertos coinciden en que el impacto del huracán fue más grave aún porque la deforestación facilitó las inundaciones y los aludes de tierra. http://www.nacion.com/ln_ee/2000/julio/09/mundo4.html

Tala en Amazonia puede alterar clima en hemisferio norte. Deforestación sin piedad. EFE. Río de Janeiro.
Según el geofísico Pedro Leite, del Instituto de Estudios Avanzados de la Universidad de Sao Paulo, la deforestación en la Amazonia puede reducir entre 10 y 15 por ciento el volumen de lluvias y provocar variaciones de temperatura de entre 1,5 y 3,0 grados Celsius. Sin embargo, el geólogo también alertó sobre el aumento de las inundaciones y sus "efectos negativos" para la población, a raíz de la tala sin control. Pero los efectos nocivos de la tala antes expuestos enlistan otro inconveniente harto conocido, pero poco tomado en cuenta: las inundaciones. De acuerdo con Leite, los árboles cumplen con la importante labor de amarrar los terrenos, lo cual evita, o por lo menos reduce, el riesgo de derrumbes y deslizamientos. Esta situación se está volviendo muy recurrente en el sector de la Amazonia, donde según el especialista, son miles las personas que cada año sufren los efectos negativos de las lluvias, a raíz de la tala indiscriminada.
http://www.nacion.com/ln_ee/2000/agosto/13/mundo10.html

[3] Natural Disasters Data Book – 2005. An Analytical Overview. March 2006.
http://www.adrc.or.jp/publications/databook/databook_2005_eng/eng.html

Latinoamérica mantiene alta vulnerabilidad en materia ambiental, según ONU. Agencia EFE. Viernes 18 de mayo, 2001 11:54:00 (Hora local). Así lo dijo el director regional del Programa de Naciones Unidas Para el medioambiente (PNUMA), Ricardo Sánchez, quien ayer jueves hizo una breve visita a Santiago. Señaló que el Panel Intergubernamnetal de Cambio Climático, que apoyan la Organización Meteorológica Mundial y el PNUMA, advirtió recientemente de que de mantenerse la situación actual, el nivel del mar puede subir entre 88 y 90 centímetros, y la temperatura entre 1 y 5,2 grados centígrados. “Ello provocaría un aumento en la intensidad de la frecuencia de los huracanes, del fenómeno de El Niño, penetraciones del mar y afectación de los sistemas marinos costeros", dijo Ricardo Sánchez. http://www.nacion.com/ln_ee/2001/mayo/18/ultima4.html

[4] En 1998 varios ríos en China, incluido el Yangtze causaron severas inundaciones, las cuales dejaron 14 millones de personas sin casa y miles de muertos. Las autoridades Chinas responsabilizaron a la explotación de bosques por causar erosión y exacerbar las inundaciones e impusieron una prohibición al aprovechamiento forestal: Esto a su vez ocasionó que la demanda de madera China se supliera explotando los bosques de Papua Nueva Guinea. “China feeds U.S. demand for wood as forests suffer”. Chicago Tribune . By Evan Osnos. December 18, 2006.
http://www.chicagotribune.com/news/specials/chi-china-timber-htmlstory,0,1381395.htmlstoryitar

Floods in southeast Asia force thousands to flee. 23 Dec. 2006 08:30:00 GMT Source: Reuters.
Malasia registró en diciembre 2006 la peor inundación en los últimos 37 años; afectando unas 100.000 personas. La severidad de las inundaciones fueron atribuidas a los fuertes lluvias registradas en el sureste asiático y la deforestación. http://www.alertnet.org/thenews/newsdesk/SP142366.htm.

Thursday, December 29, 2005. Logging eyed as cause for Caraga floods. By Ben Serrano Caraga correspondent. El aprovechamiento forestal y la tala ilegal son responsables de las inundaciones en la región XIII de Caraga, Filipinas. http://www.abs-cbnnews.com/storypage.aspx?StoryId=26513.

Group: Logging, global warming to trigger more floods. January 31, 2007. Greenpeace Internacional argumenta que las inundaciones observadas en años recientes en el sureste Asiático se deben a los efectos del cambio climático y al aprovechamiento destructivo de los bosques.
http://www.abs-cbnnews.com/storypage.aspx?StoryId=26513

[5] *1.500 personas tratan de reponerse del desastre en Cartago.* "Con el agua en la cintura empecé a pegar gritos ". Comisión de Emergencias estima daños en más de ¢100 millones Sofía Quesada, colaboradora y Alejandro Arley aarley@aldia.co.cr. En total, según datos de la Comisión Nacional de Emergencias, 300 viviendas y 1.500 personas sufrieron por los embates de la naturaleza. De esa suma, 102 casas presentan daños severos o parciales en su estructura y 30 fueron arrasadas o tienen pérdida total. "La emergencia dejó daños que fácilmente superan los ¢100 millones. Afortunadamente no hay víctimas que lamentar ni heridos graves", dijo Daniel Gallardo, presidente de la CNE, que decretó alerta roja en los cantones El Guarco y central de Cartago.
¿Qué pasó?: Julio Madrigal, geólogo de la CNE, explicó que con las fuertes lluvias en Llano Grande, una enorme cantidad de sedimentos se desprendieron y por el cauce del río Reventado bajaron piedras, palos y lodo. La corriente era tan fuerte y veloz, que en los puntos donde el río tiene una curva, el agua no tomó la ruta del cauce y empezó a inundar calles, casas y comercios aledaños.
http://www.aldia.co.cr/ad_ee/2007/octubre/05/nacionales1265086.html

10 viviendas fueron arrasadas por el río Reventado. Cartago: cabeza de agua afectó 200 casas. CNE habilitó tres albergues, evalúan daños en cuatro puentes. Sofía Quesada Chavarría, colaboradora. squesada@aldia.co.cr
Mil personas afectadas y 10 viviendas arrasadas dejaron a su paso las furiosas aguas del río Reventado, que sumió en crisis las comunidades de La Lima, San Nicolás, Quircot, El Guarco y Llano Grande de Cartago. En total 200 viviendas se inundaron ayer, 30 de ellas con daños severos, debido a una cabeza de agua que arrasó con todo lo que se encontraba a su paso, según detalles de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE). "El río recoge todo tipo de basura desde Tierra Blanca, pero el tapón se hace aquí, por eso se desbordó el río", lamentó Camacho. Además de las 200 casas anegadas, se reportaron cuatro puentes falseados en La Lima, Quircot, Llano Grande y Taras. http://www.aldia.co.cr/ad_ee/2007/octubre/04/nacionales1263798.html

[6] *The truth about global warming*. By Sandi Doughton. Seattle Times staff reporter. Tuesday, October 11, 2005 - Page updated at 01:23 PM http://seattletimes.nwsource.com/html/nationworld/2002549346_globewarm11.html , Sunday, October 9, 2005: Page updated at 12:00 a.m. Proving global warming A world of evidence says global warming is real. http://seattletimes.nwsource.com/news/nation-world/globalwarming/1.html

El fenómeno de "El Niño" es el principal responsable. El Reventado está sin agua. Según el MINAE, la entrada de "La Niña" revertiría déficit de lluvia. Esteban Rojas Sáurez. erojas@aldia.co.cr. Según el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), en los meses de diciembre, enero y febrero se presentó un déficit de lluvias de un 40 por ciento en la vertiente del Caribe, lo cual afectó el caudal del río. "El Niño" es el causante de la disminución en las lluvias y esto ha provocado un importante descenso en los caudales de los mantos acuíferos en todo el territorio nacional, pues las temperaturas se incrementaron 0,2 grados. Según el ministro de Ambiente y Energía, Roberto Dobles, los problemas causados por "El Niño" se hicieron sentir en los ríos a nivel nacional. Dobles afirmó que el mes de abril es el más seco del año, y se espera que, con la entrada de "La Niña", se pueda revertir el déficit de lluvias. "El problema de falta de lluvias no es solo de Costa Rica, pues los efectos del calentamiento global se sienten en todo el mundo", dijo Dobles.
http://www.aldia.co.cr/ad_ee/2007/abril/04/nacionales1053132.html

[7] Franco Biondi, Daniel R. Cayan. North Pacific Decadal Climate. Variability Since AD 1661 .Journal of Climate, Volume 14, Number 1, pp. 5-10, January 2001.
http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/pubs/biondi2001/biondi2001.html

[8] Michael Mccarthy "Why 'extreme events' are likely to become the norm". Independent, The (London). Jun 26, 2007. FindArticles.com. 10 Oct. 2007. http://findarticles.com/p/articles/mi_qn4158/is_20070626/ai_n19321249

The day the rains came: danger from 200 rivers as floods devastate. Independent, The (London), Jun 26, 2007 by Jonathan Brown http://findarticles.com/p/articles/mi_qn4158/is_20070626/ai_n19321242

Rajendra K. Pachauri "Is there a nexus with global climate change? - Extreme Weather". UN Chronicle. Dec 2002. FindArticles.com. 10 Oct. 2007. http://findarticles.com/p/articles/mi_m1309/is_4_39/ai_96951869

[9] Para mayores detalles del proyecto y los miembros del consorcio ver http://www.ceg.ncl.ac.uk/epicforce/

[10] Project number EPIC FORCE PL 510739. La duración del proyecto fue de tres años (2005-2008)

[11] Ewen, J., Parkin, G., and O´ Connell, P. E. 2000. SHETRAN: distributed river basin flow and transport modelling system. Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., J. Hydrologic Engrg., 5:250-258. 2000.

[12] La estación fue destruida por la descarga asociada al huracán Cesar en Julio de 1996.

Costa Rica: su clima e hidrología

Costa Rica, con 51.100 Km^2, es el segundo país más pequeño de Centro América; limita al norte con Nicaragua, al sur con Panamá, al oeste con el Mar Caribe y al oeste con el Océano Pacífico. Su población para el año 2005 se estimaba en 4.3 millones de personas. Geográficamente se localiza entre 08°00' y 11°15' N y 82°30' y 86°00 O. La latitud media se estima en los 10º Norte y la longitud media en 84°15' Oeste (Fig. 2).

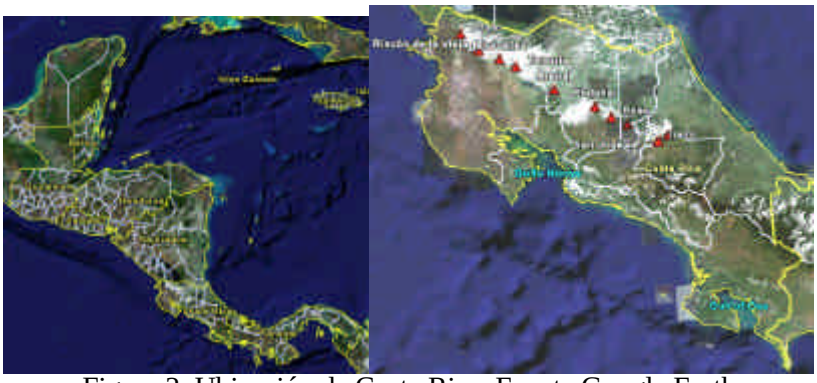


Figura 2: Ubicación de Costa Rica. Fuente Google Earth.

En Costa Rica, el clima y en especial la precipitación son el resultado del desplazamiento de los vientos a escala sinóptica (alisios, oestes sinópticos y oestes ecuatoriales) y de mesoescala (brisas de mar y tierra, brisas de valle y montaña, ondas de montaña y los vórtices de sotavento), modificados localmente por la orientación del relieve (Ej. áreas de solano orientadas hacia el este y de umbría hacia el oeste; vertientes de barlovento y sotavento). Las áreas a barlovento reciben mayor cantidad de precipitación que las de sotavento como resultado de la formación de lluvias orográficas (ascenso forzado de las masas de aire húmedo). Los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos en Costa Rica están relacionados con la actividad ciclogenética en la Cuenca del Caribe, la cual produce durante el verano boreal frecuentes inundaciones y "temporales" en la Vertiente del Pacífico, en tanto que los frentes fríos producen los temporales en la Vertiente del Caribe durante el invierno del hemisferio norte (Fig. 3).

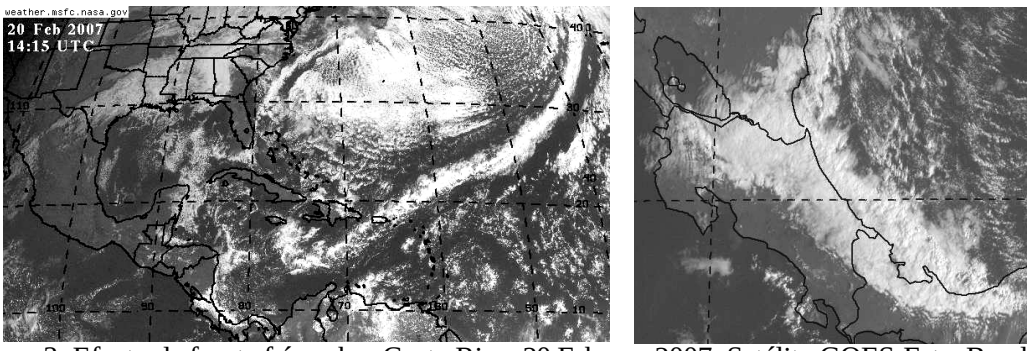


Figura 3: Efecto de frente frío sobre Costa Rica. 20 Febrero 2007. Satélite GOES Este. Banda Visible. 8:15 am. hora local Costa Rica. Los frentes afectan principalmente la Vertiente Caribe y Norte.

Vientos en Costa Rica

Vientos sinópticos

Los vientos alisios, con dirección este-noreste, ejercen una marcada influencia sobre el clima de Costa Rica durante la mayor parte del año; sin embargo son interrumpidos por vientos con componente oeste especialmente durante la estación lluviosa (mayo-noviembre) en la vertiente Pacífica. Su comportamiento anual se caracteriza por un aumento considerable en su velocidad en diciembre y enero (conocidos localmente como Nortes), así como en julio; lo que causa una reducción de la precipitación en la vertiente Pacífica y un incremento de las lluvias en las vertientes Norte y Caribe.

En los meses de diciembre-abril se experimentan fuertes lluvias en la vertiente Norte y Caribe y una reducción en la precipitación en la vertiente Pacífica. Durante los meses de mayo a noviembre la precipitación que predomina en el Pacífico es la convectiva influenciada por las brisas del Pacífico y los vientos con una dirección oeste-noroeste. El comportamiento de la precipitación es modificado por las diferentes fases de El Niño Oscilación Sur (ENOS).

Los vientos Oestes sinópticos de la troposfera baja y media afectan todo el territorio nacional. Su presencia se debe a disturbios ciclónicos [13] (Ej. bajas presiones, tormentas tropicales o huracanes) localizados en el Mar Caribe y el norte y noreste de América Central. Estos vientos generan lluvias intensas en la Vertiente Pacífica.

Los Oestes ecuatoriales de la troposfera baja afectan mayormente el Pacífico y el Valle Central de Costa Rica y se originan por el desplazamiento de la vaguada[14] ecuatorial hacia el hemisferio Norte. Estos vientos afectan la costa occidental de América Central de abril a octubre.

Vientos de mesoescala

Los vientos de mesoescala (brisas de mar y tierra, de valle y montaña, ondas de montaña y vórtices de sotavento) son sistemas que operan a escala media y están asociados a las características de la superficie o de la topografía de la región. El mecanismo que induce dichos vientos es térmico (diferencias de calor entre el día y la noche) y/o mecánico (ascenso orográfico).

Brisas de mar y tierra

Las brisas de mar y tierra son el resultado de un calentamiento (día)/enfriamiento (noche) desigual en la interfase océano-área costera; lo que crea un gradiente térmico horizontal de temperatura que genera un sistema de circulación atmosférico caracterizado por un flujo de aire desde el océano hacia la tierra durante el día y desde la tierra hacia el océano durante la noche. Las masas de aire provenientes del océano acarrean vapor de agua la cual forma nubes conforme se adentran en tierra firme. La brisa de tierra es menos intensa que la de mar por tener una fuente de calor menor. En los meses de noviembre y abril, aumenta la velocidad del viento debido al incremento de los vientos alisios, inhibiendo el desarrollo y avance de las brisas de mar del Pacífico. Además hay un aumento en la cortante vertical del viento que inhibe la convección.

Brisas de montaña y valle

El mecanismo que genera las brisas de montaña y valle es similar al explicado para las brisas de mar y tierra. Durante el día las laderas absorben energía y se calientan, creando un diferencial de temperatura y presión con respecto a los fondos de los valles (más fríos); la diferencia de presión y el ascenso del aire caliente en la ladera crea un vacío, el cual es llenado por aire proveniente de la parte inferior de la ladera. Durante la noche el fenómeno se invierte y los vientos se desplazan de la ladera al fondo de los valles.

Regionalización hidroclimática de Costa Rica

Desde el punto de vista hidroclimático, el país puede dividirse en tres vertientes: Pacífico, Caribe y Norte. La vertiente Pacífica a su vez se subdivide en Norte, Central y Sur y la Caribe en Norte y Sur (Fig. 4).

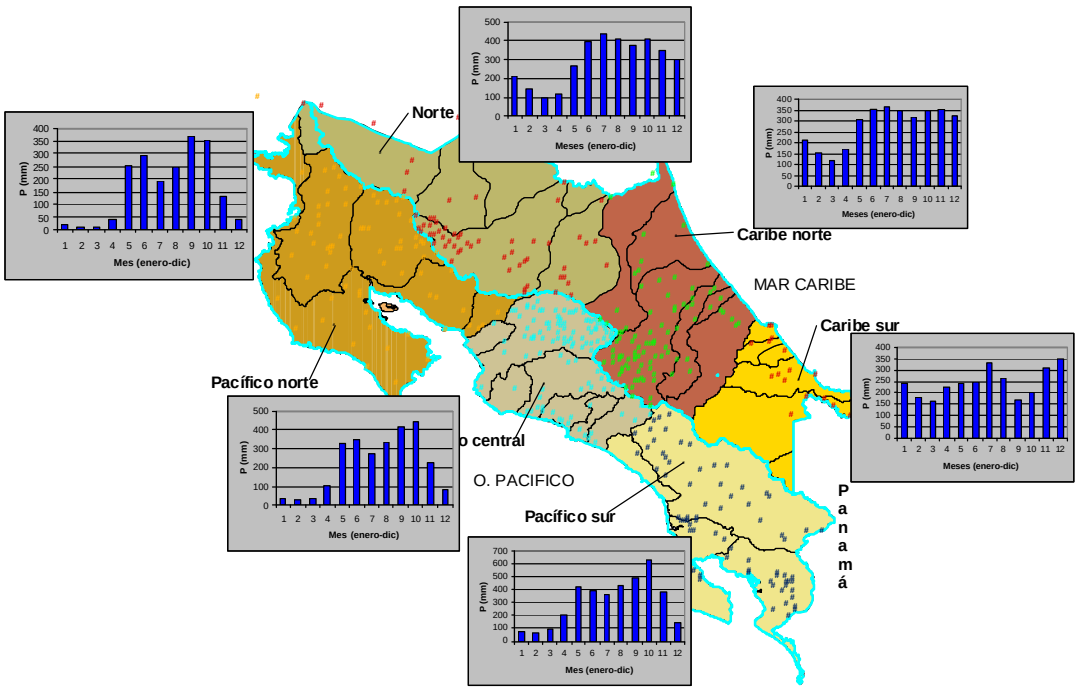


Figura 4: Vertientes y subvertientes de Costa Rica. Los puntos indican ubicación de estaciones meteorológicas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de precipitación del Instituto Meteorológico Nacional.

Vertiente Pacífica

La vertiente Pacífica está influenciada tanto por los vientos Alisios (estación seca) como por los oestes sinópticos y los oestes ecuatoriales (estación lluviosa). Durante el verano del hemisferio norte se forman zonas de baja presión en el Caribe (ciclones[15]) con vientos que giran en el sentido contrario de las manecillas del reloj y hacia el centro de presión. Esto vientos alcanzan con frecuencia las costa de Yucatán y Honduras, arrastrando vientos del Pacífico, debilitando la influencia de los alisios sobre el Caribe y ocasionando fuertes lluvias durante pocos días en la costa Pacífica de Costa Rica. Las cordilleras de Guanacaste, Tilarán, Central y

Talamanca actúan como barreras mecánicas que impiden el paso del aire húmedo a la costa Caribe y por tanto en dicha zona se goza de buen tiempo durante los temporales del Pacífico. Cuando el ciclón gana velocidad y tamaño se convierte en un huracán[16], afortunadamente Costa Rica no está en la ruta directa de los huracanes y solo se siente su efecto indirecto en la vertiente Pacífica; sin embargo los huracanes Joan (categoría 4) y Mitch (categoría 5) se acercaron a la costa Caribeña en 1983 y 1988, respectivamente, causando severas inundaciones.

Subvertiente Pacífico Norte

Esta región representa el 22.4% del territorio nacional (11 464 Km2) e incluye aquellas cuencas cuyos ríos nacen en las faldas suroccidentales de las cordilleras de Guanacaste y Tilarán y desembocan en Golfo de Nicoya y en el océano Pacífico. En promedio la zona recibe 10 horas sol durante la estación seca y 6 durante la estación lluviosa.

La estación seca es muy severa y se extiende desde los primeros días de diciembre hasta abril; la estación lluviosa corresponde al resto del año. En los meses de julio-agosto (Veranillo de San Juan) se registra una ligera reducción de la precipitación. El año hidrológico inicia en mayo y concluye en abril. Durante la época seca los vientos del sur corresponden a las brisas de mar y en la época lluviosa son producto de la combinación de la brisa de mar y los oestes ecuatoriales. A partir del mes de diciembre se registra un aumento en la velocidad del viento, la cual alcanza su máximo en febrero con consecuencia del refuerzo del viento Alisio que penetra a través de los pasos y sobre la cordillera de Guanacaste. La velocidad del viento disminuye en mayo (inicio de la estación lluviosas) y en junio, aumentando nuevamente en Julio (presencia de veranillo) y alcanzando su mínimo en setiembre-octubre (máximo de precipitación de la estación lluviosa). La estación seca está bien definida entre diciembre y marzo (0 precipitación). La dirección predominante del viento del N, NE, asociada con vientos alisios fuertes.

Es la región más seca del país; la precipitación media anual es de 1991mm (±439mm, N=74). Los meses más lluviosos son junio (290 mm), setiembre y octubre con 367mm (±86mm) y 352mm (±76mm), respectivamente (Fig. 5). La descarga media anual es de 1110 mm (±286mm, N=9); generándose el 35.4% de la misma durante los meses de setiembre y octubre; en tanto que en los meses de enero-abril (periodo de estiaje) se genera el 11.9% de la escorrentía anual.

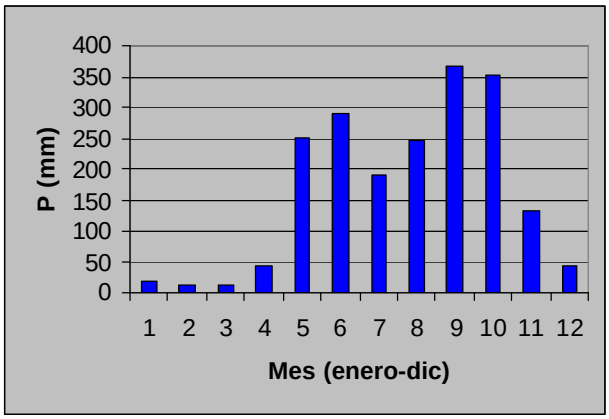


Figura 5: Distribución de precipitación media mensual (mm). Subvertiente Pacífico Norte. Fuente: Basado en datos publicados por el IMN, 1988.

Esta región ha recuperado parte de su cobertura boscosa durante los últimos 15 años. Basados en los datos de cobertura forestal para 1996/97 (CCT-CIEDES, 1998) el autor estima que la región posee el 19% del bosque del país o sea 3840.9Km2 (Fig 4); además existen 191.6 Km^2 sin clasificar por presencia de nubes. Los bosques de la región son en su mayoría secundarios y/o remanentes, poco densos; caducifolios en elevaciones inferiores a 300m y siempre verdes en las zonas altas (Cordilleras de Guanacaste, Tilarán y península de Nicoya).

Subvertiente Pacífico Central

La subvertiente Pacífico Central representa el 13% del territorio nacional (6645Km^2). A dicha subvertiente pertenecen las cuencas cuyos ríos nacen en las faldas sur occidentales de la cordillera Volcánica Central y en la sección suroccidental de la cordillera de Talamanca e incluye los Valles Central y de Parrita. La región incluye tanto zonas moderadamente secas (Ej. Valle Central) como moderadamente húmedas (Ej. Parrita). En promedio recibe 2628mm ((±794mm, N=114) de lluvia; con una estación seca variable que se extiende desde diciembre hasta abril. Los meses más lluviosos son agosto, setiembre y octubre con 415mm (±97mm), 438mm (±136mm) y 335 mm, respectivamente; con un segundo pico en mayo (329mm) y junio (343mm) (Fig. 6). Durante la estación seca se registra en promedio 8 horas de sol y durante la estación lluviosa 4 horas. Los meses mas soleados son enero, febrero, marzo y abril. Durante la estación seca predominan los vientos con dirección Este-Noreste en tanto que durante la estación lluviosa predominan los vientos con dirección sur. La velocidad del viento es muy irregular a lo largo del año.

La depresión tectónica Central se caracteriza por vientos con una dirección predominante Este, Noreste y una distribución irregular de la velocidad a lo largo del año. A partir del mes de diciembre se registra un aumento en su velocidad, la cual alcanza su máximo en febrero con consecuencia del refuerzo del viento Alisio que penetra a través de los pasos en la cordillera Volcánica Central. El viento disminuye en mayo (inicio de la estación lluviosas) y junio, aumentando nuevamente en Julio (presencia de veranillo) y alcanzando su mínimo en setiembre-octubre (máximo de precipitación de la estación lluviosa).

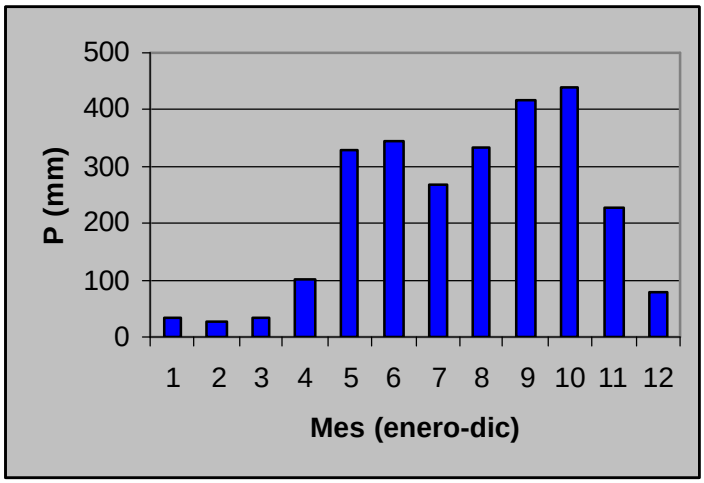


Figura 6: Distribución de precipitación media mensual (mm). Subvertiente Pacífico Central. Fuente: Basado en datos publicados por el IMN, 1988.

La descarga media anual es de 1767mm (±895mm, N=13); generándose el 35.7% de la misma durante los meses de setiembre y octubre; en tanto que en el mes de enero-abril (periodo de estiaje) se genera el12.2% de la escorrentía anual.

Esta es la región hidrológica que posee la menor cobertura forestal del país (1757.21Km^2) lo que equivale a un 8.7% del total nacional. Por presencia de nubes existen 330.7Km^2 sin clasificar, por cuanto la cobertura forestal podría ser superior a dicho valor.

Subvertiente Pacífico Sur

Esta región representa el 17.1% del territorio nacional (8755Km^2) e incluye las cuencas cuyos ríos nacen en las faldas sur y sur orientales de la cordillera de Talamanca. Los Valles de Diquis, General, Coto Brus y Colorado forman parte de esta subvertiente.

Al interior de la región pueden distinguirse dos subregiones; la primera correspondiente a los valles de General y Coto Brus con una precipitación media anual de 3056mm (±553mm) y la segunda a la Península de Osa con 4151mm (±790mm). Los vientos tienen direcciones SO y O como producto de las brisas de mar en la época seca y una combinación de la brisa del mar y los oestes ecuatoriales en la época lluviosa (Zárate, 1978). La estación seca es variable y se extiende desde enero hasta marzo; los meses más lluviosos son mayo (417mm), agosto (435mm), setiembre (491 mm ± 113mm) y octubre (624 mm ± 131mm) (Fig. 7). Los vientos dominantes entre las 10 am y 6 pm son los ecuatoriales y las brisas de mar con un componente Oeste. Durante el resto de la noche y en primeras horas de la mañana las condiciones son de calma. En el Valle del General se presentan por las noches brisas de montaña originadas en la cordillera de Talamanca con una dirección Norte y Noreste. Durante la estación seca predominan las brisas de mar y de tierra.

La península de Osa recibe más lluvia que el resto de la zona y constituye un “reservorio de alta biodiversidad” limitada por zonas más secas hacia el norte y este (Valles del General y Coto Brus) y la cordillera de Talamanca hacia el este. La mayor precipitación en Osa se debe al desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI) hacia el norte, lo que permite que los alisios del sureste atraviesen el Ecuador por territorio Panameño, el cual no tiene elevadas montañas y por tanto las masas húmedas pueden llegar hasta el Pacífico donde producen precipitación adicional.

La descarga media anual es de 2124mm (±259mm, N=7); generándose el 36% de la misma durante los meses de setiembre y octubre; en tanto que en el mes de enero-abril (periodo de estiaje) se genera el 6.5% de la escorrentía anual.

La cobertura forestal de la Región era de 3021.53 Km^2 (15.0% del bosque nacional) para 1996/97 (CCT-CIEDES, 1998); aunque al igual en la región norte su cobertura real es posiblemente superior ya que existen 725.8 Km^2 sin clasificar debido a la cobertura de nubes.

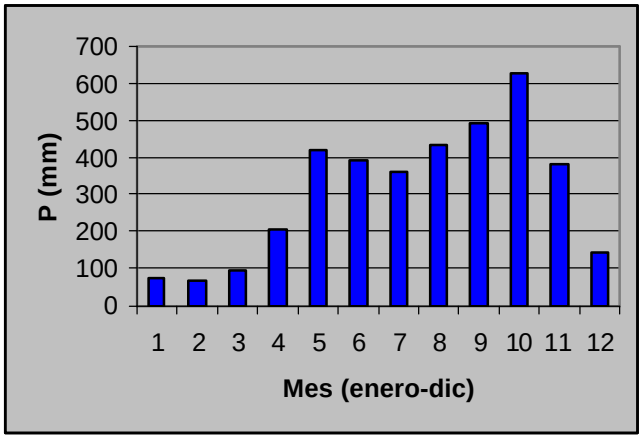


Figura 7: Distribución de precipitación media mensual (mm). Subvertiente Pacífico Sur. Fuente: Basado en datos publicados por el IMN, 1988.

Vertiente Norte

Esta región representa el 18.1% del territorio nacional (9270Km^2) e incluye las cuencas cuyos ríos nacen en las faldas nororientales de las cordilleras de Guanacaste y Tilarán y desembocan en el río San Juan. La topografía dominante es de plana a ondulada (Ej. Llanuras de San Carlos y Guatusos). Los vientos alisios están presentes en la zona durante todo el año con velocidades medias mensuales que oscilan entre 15.8 y 37.1 Km/h. La velocidad media mensual se incrementa en diciembre, alcanzando su máximo en febrero; luego disminuye hasta junio, aumentando nuevamente en julio y descendiendo nuevamente hasta alcanzar un mínimo en septiembre. La cantidad de precipitación en las llanuras disminuye conforme se aleja de la costa Caribe (Ej. Puerto Viejo > Pital > Muelle de San Carlos > Guatuso > Upala). La región no posee una estación seca definida, aun cuando se presenta una reducción en la cantidad de precipitación en el mes de marzo (91mm ± 66mm, N=47), especialmente en el sector noroccidental. La región puede subdividirse en dos subregiones; la primera formada por las áreas con elevaciones inferiores a 700 msnm con una precipitación media anual de 3213mm (±919 mm) y la segunda formada por áreas ubicadas sobre los 700 msnm, con una precipitación media anual de 3991mm (±1241 mm). Los meses más lluviosos son julio (383mm±191 mm), agosto (363mm ± 166mm), setiembre (335mm ± 142mm) y octubre (401mm ± 116 mm) (Fig.8). El viento predominante durante todo el año en Santa Clara es de componente sur, aunque los alisios de componente Norte y Noreste son los que generan precipitaciones orográficas en las cordilleras de Guanacaste y Tilarán.

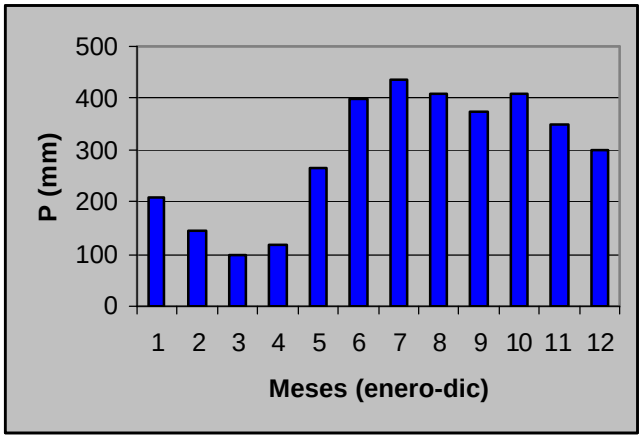


Figura 8: Distribución de precipitación media mensual (mm). Vertiente Norte. Fuente: Basado en datos publicados por el IMN, 1988.

La descarga media anual es de 3062mm (±623mm, N=9); generándose el 23.1% de la misma durante los meses de setiembre y octubre; en tanto que en el mes de abril (periodo de estiaje) se genera solo el 3.6% de la escorrentía anual.

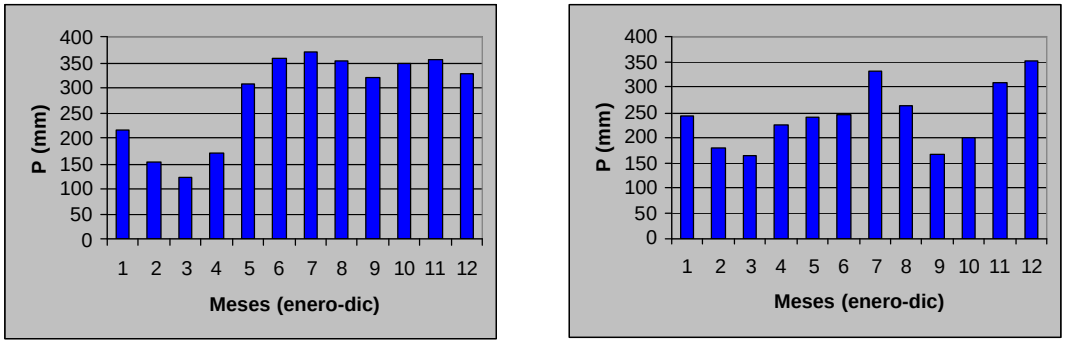
La cobertura forestal estimada para la región era de 2755.425 Km^2 para 1996/97(CCT-CIEDES, 1998); lo que representa un 13.7% del bosque a nivel nacional; aunque es posible que dicho valor sea superior debido a que existen 1831.86Km^2 sin datos debido a la presencia de nubes/sombras en las imágenes utilizadas para crear el mapa. Los bosques de la región se encuentran muy fragmentados y tienden a concentrarse en las zonas montañosas y en el extremo noreste de la región.

Vertiente Caribe

La vertiente Caribe abarca el 29.3% del territorio nacional (14974Km^2) e incluye los ríos que nacen en las faldas nororientales de las cordilleras Volcánica Central y de Talamanca. La Región está formada tanto por terrenos planos (Ej. Llanuras de Tortuguero, Valles de la Estrella y Talamanca) como por áreas con una topografía fuertemente escarpada y montañosa (Ej. Fila Matama, flanco oriental de los Volcanes Irazú y Turrialba). En la vertiente Caribe predomina durante el día los vientos Alisios con dirección Norte-Noreste y Este y por la noche, en la costa se presentan brisas de tierra con direcciones Sur-Oeste y Oeste. Marzo es un mes típicamente seco en el Caribe, sin embargo en el año 2006 se registraron récords históricos asociados a un temporal en el Caribe, reflejo de la gran anomalía climática que caracterizó a este mes. La precipitación del mes superó el récord vigente de lluvia en Limón, acumulándose 697mm, superando en 282 mm el valor récord anterior registrado en 1942. Además también se registró el día más lluvioso desde 1968, ya que en solo 24 horas se acumularon 214 mm, superando en 54 mm el récord anterior de 1968 (http://www.imn.ac.cr/publicaciones/BMET012007.pdf).

La región puede subdividirse en dos subvertiente: Norte y Sur; la primera se caracteriza por lluvias superiores a 300 mm mensuales desde junio hasta diciembre y una mínima en marzo (118 mm) y la segunda por máximos en julio (342 mm), noviembre (310 mm) y diciembre (368 mm) y una reducción en la precipitación en marzo (180 mm) octubre (194 mm) (Fig. 9).

La subregión Caribe Norte puede a su vez subdividirse en dos sectores: el montañoso y el costero; el primero formada por Cartago, el Valle de Orosi, Turrialba y la cima de la cordillera de Talamanca con una precipitación media anual de 2345mm (±850 mm) y una estación seca durante los meses de febrero (64±34mm, N=31) y marzo (46±20mm, N=31) y la segunda formada por el valle del Reventazón y la zona costera, con una precipitación media anual de 3772mm (±1090mm, N=82) y sin una estación seca bien definida.



Caribe Norte Caribe Sur

Figura 9: Distribución de precipitación media mensual (mm). Subvertientes Caribe Norte y Sur. Fuente: Basado en datos publicados por el IMN, 1988.

Los *temporales del Atlántico* son ocasionados por perturbaciones atmosféricas que afectan la costa Caribe y que producen lluvias y lloviznas por periodos continuos de 1 hasta 15 días en los meses de *diciembre* y *enero*. Este fenómeno es ocasionado por la incursión de los frentes fríos del hemisferio norte (invierno) en el Golfo de México o a lo largo de la costa este de los Estados Unidos, creando zonas de alta presión (anticiclones) sobre el Caribe Norte. Este anticiclón se desplaza hacia el este con vientos fríos y cargados de humedad que rotan de norte a sur (en el sentido de las manecillas del reloj) fortaleciendo los vientos alisios que descargan su humedad como lluvia en el Caribe Centroamericano. Durante los meses de mayo-octubre también pueden presentarse temporales en el Caribe costarricense, sin embargo en este caso son generados por perturbaciones temporales en las Ondas del Este, un sistema de vientos se mueven normalmente en la alta atmósfera y que generan lluvias persistentes en el Caribe.

La descarga media anual de la vertiente Caribe es de 3093mm (±1076mm, N=20); generándose el 21.6% de la misma durante los meses de setiembre y octubre; en tanto que en el mes de abril se genera el 4.4% de la escorrentía anual.

La cobertura forestal estimada para la región para 1996/97 era de 8745.9 Km^2 (CCT-CIEDES, 1998), lo que representa un 43.5% del bosque del país; es importante recalcar que dicha área incluye a las palmas de yolillo (*Raphea taedigera*). La mayor parte de los bosques se encuentran en las faldas orientales de las cordilleras Volcánica Central, Talamanca y en ele extremo noreste de las llanuras de Tortuguero.

Precipitación y escorrentía en Costa Rica: patrón espacial

Para valorar el efecto del bosque sobre los eventos extremos es necesario considerar no solo la distribución del bosque a nivel de cuenca; sino también la distribución espacial y temporal

del recurso hídrico. La región Pacífico Norte es la que recibe la menor cantidad de lluvia en el país, en tanto que las regiones Norte, Atlántico y Pacífico Sur reciben la mayor cantidad de lluvia. La región Pacifico Central, recibe una cantidad de lluvia intermedia.

La orografía y la presencia de las dos masas oceánicas juegan un papel determinante en los procesos generadores de lluvia en Costa Rica. Los sitios de mayor precipitación se encuentran a elevaciones medias en las cordilleras de Guanacaste, Volcánica Central y de Talamanca. La Península de Osa es otra zona de alta precipitación.

En la subvertientes Pacífico Norte, Central y la porción central del Pacífico Sur (Valles del General y Coto Brus) reciben entre 50 y 75 mm de lluvia durante el mes de diciembre. Esto marca el inicio de la estación seca en la vertiente Pacífica de Costa Rica. Sin embargo, en las regiones Norte, Atlántica y en la Península de Osa la precipitación durante este mes se mantiene entre 200 y 300 mm.

En síntesis, de los 159.9 Km^3 de lluvia que recibe el país, la región Atlántica aporta el 35%; el Pacífico Sur el 21.4%; la región Norte el 18.1%; el Pacífico Norte el 14.5% y el Pacífico Central el 11.1%. (Fig.10). Aun cuando se han utilizado todas las estaciones disponibles en el país para realizar los cálculos, el lector debe comprender que son aproximaciones debido a la ausencia de estaciones en la Cordillera de Talamanca y la baja intensidad de muestreo para la zona montañosa de la región Atlántica y Norte del país. En el análisis también se utilizaron datos de 10 estaciones meteorológicas ubicadas en el sur de Nicaragua y suministradas por el Instituto de Estudios Territoriales de Nicaragua (INETER).

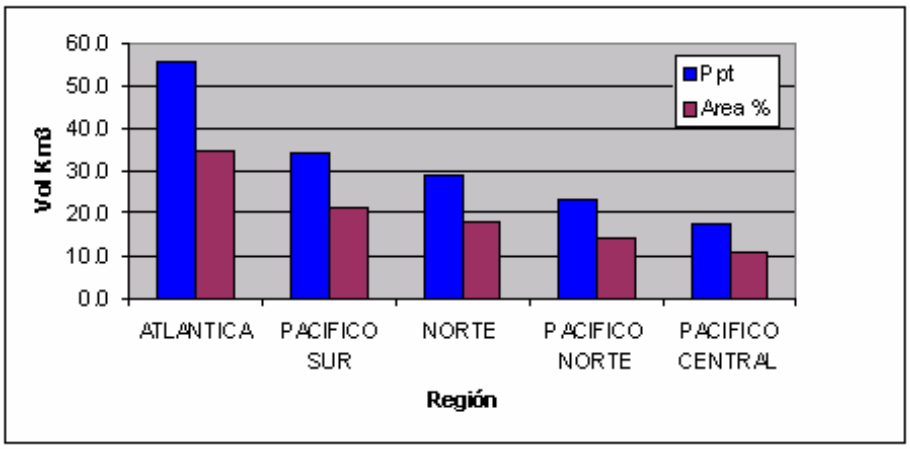


Figura 10:Volumen de lluvia (Km3) y área (%) por región hidrológica de Costa Rica.

El valor de la descarga media anual y estacional de una cuenca dependerá en primera instancia del patrón espacial y temporal de la precipitación (insumo) y en segundo lugar de la interacción con otros factores tales como el uso-cobertura del suelo (Ej. forestal, pasto, urbano, etc.), topografía, suelo, elevación y tamaño de la cuenca. Por ejemplo, las cuencas de la región Pacífico Norte reciben una menor cantidad de lluvia y por ende también producen una menor cantidad de descarga; también es frecuente encontrar cauces sin agua en dicha región durante la estación seca (diciembre-abril). Por otro lado, las cuencas de la región Atlántica reciben una

mayor cantidad de precipitación y por ende también producen un mayor volumen de escorrentía (Fig. 25).

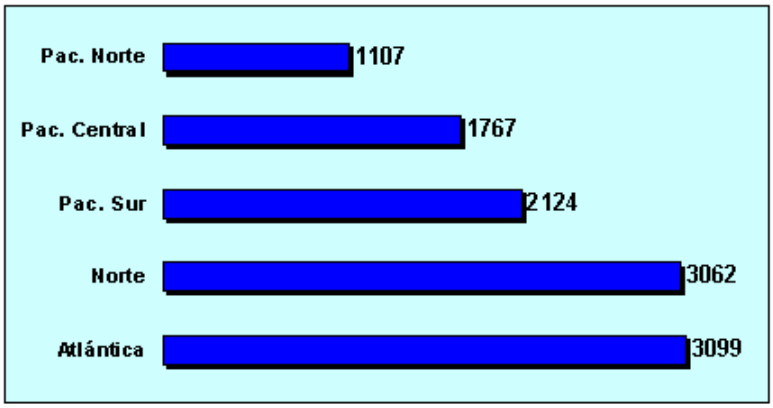


Figura 11: Descarga media anual (mm) por Región Hidrológica. Basado en datos publicados por el ICE, 1993 y cálculos del autor.

Referencias

Alfaro, E. y J. A., Amador, 1996. El Niño Oscilación del Sur y algunas series de temperatura máxima y brillo solar en Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, 3(1), 19-26.

Alfaro, E. y J. A., Amador, 1997. Variabilidad y cambio climático en algunos parámetros sobre Costa Rica y su relación con fenómenos de escala sinóptica y planetaria. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, 4(1), 51-62.

Amador, J. A. y E. Alfaro, 1996. La Oscilación Cuasi-Bienal, ENOS y acoplamiento de algunos parámetros superficiales y estratosféricos sobre Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, 3(1), 45-54.

Amador, J. A., 1998. A climate feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos,5(2).

Campos, M. y Castro, V., 1992. El clima a sotavento de las montañas de Costa Rica. Tópicos Meteorológicos, N° 2.

Magaña, V., J. A. Amador y S. Medina, 1999. The Midsummer Drought over Mexico and Central America J. Climate, 12, 1577-1588.

Mora, Ileana y Amador, Jorge, 2000. EL ENOS, el IOS y la corriente en chorro de bajo nivel en el oeste del Caribe. Top. Meteor. Oceanog., 7(1):1-20,2000

Muñoz, A. C. et. al. 2002. Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia. Top. Meteoro. Oceanog. 9 (1) 1-13, 2002.

Muñoz, A.C., W. Fernández, J. A. Gutiérrez y E. Zárate, 2002: Distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica. Tópicos Meteorológico y Oceanográficos

Zárate, H. Eladio, 1977. Principales sistemas de vientos que afectan a Costa Rica y sus relaciones con la precipitación. Tesis de grado. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica.

Zárate, H. Eladio, 1980. El viento en San José. Nota técnica. San José, C. R.: Instituto Meteorológico Nacional.

Zárate, H. Eladio, 1981. Regímenes de lluvia y vientos en Limón, Costa Rica. Informe Semestral. San José. Instituto Geográfico Nacional.

Chacón, R. E., y Fernández, W., 1984. Temporal and spatial rainfall variability in the mountainous region of the Reventazón river basin, Costa Rica, Journal of Climatology, Vol. 5.

---

[13] Un ciclón tropical es tormenta de gran magnitud asociada a un centro de baja presión (no frontal) y de núcleo caliente, en donde los vientos giran en contra de las manecillas del reloj (hemisferio norte) acompañado de bandas nubosas en forma de espiral. El huracán es la máxima expresión de un ciclón tropical.

[14] La vaguada es la entrada de aire frío que desciende de las capas superiores de la atmósfera y que, al ponerse en contacto con el aire cálido adyacente a la superficie terrestre, genera inestabilidad y produce nubosidad y lluvias constantes.

[15] La temporada de ciclones tropicales en el Atlántico normalmente inicia en junio y termina en noviembre, aunque en algunos años puede extenderse hasta enero.

[16] Un huracán es un ciclón tropical en el que el viento medio máximo en superficie (velocidad media en un minuto) es de 118 km/h . (74 millas por hora) (64 nudos), o superior.

Inundaciones en Costa Rica y estudio de caso en una cuenca forestada del Caribe Costarricense: Evidencia de los últimos 34 años[1].

Jorge Fallas Gamboa (jfallas56@gmail.com), Investigador Proyecto EPIC-FORCE-UNA y Carmen Valverde Morales, Investigadora Proyecto EPIC-FORCE y profesora Escuela de Ciencias Ambientales, UNA (ginette.valverde@gmail.com).

RESUMEN

En el presente trabajo se analizó la frecuencia y distribución espacio-temporal de las inundaciones registradas en Costa Rica para el periodo 1970-2004. Los datos provienen de la base de desastres del proyecto Desinventar. A nivel nacional, los registros correspondientes a inundaciones/avenidas se analizaron por distrito y cuenca hidrográfica utilizando ArcView GIS. También se realizó un análisis más detallado para la cuenca del río Matina con el objeto de explorar la relación entre cobertura forestal e inundaciones. Los resultados indican que a nivel nacional se ha observado un aumento en el número de inundaciones y damnificados entre 1970 y 2004. Para la cuenca del río Matina también se observó la mismo tendencia, aun cuando la cuenca mantuvo su cobertura forestal entre 80 y 90% durante el periodo de análisis. El estudio muestra que el bosque, aun cuando mantiene la respuesta hidrológica normal de la cuenca, por sí solo no puede eliminar la vulnerabilidad de las poblaciones ubicadas en las riberas del río ó en su planicie de inundación. El efecto regulador del bosque es mínimo ante avenidas extremas asociadas a largos periodos de precipitación ó a eventos climáticos como los ciclones tropicales.

ABSTRACT

On this paper we analyzed both the frequency and spatio-temporal distribution of floods in Costa Rica between 1970-2004. The data came from the disaster database of Desinventar project. Floods were analyzed by district and main watershed using ArcView GIS. Also a more detailed analysis was carried out for the Matina river basin to explore the relationship between forest cover and floods. The results showed that at national level it has been an increase in both the number of floods and victims between 1970 and 2004. For the Matina river basin the same pattern was observed, even though the watershed maintained its forest cover between 80 and 90% during the study period. The study shows that the forest, maintains the natural hydrological behaviour of the catchment, however, by itself cannot eliminate the vulnerability of people and infrastructure located in the riverbanks or in the flood plain. The regulator effect of the forest is minimum in the presence of extreme events associated to long periods of precipitation or to climatic events such as tropical cyclones.

Palabras claves : inundaciones, bosque, cuenca río Matina, calentamiento global, cambio climático, ciclo hidrológico, eventos hidroclimáticos extremos.

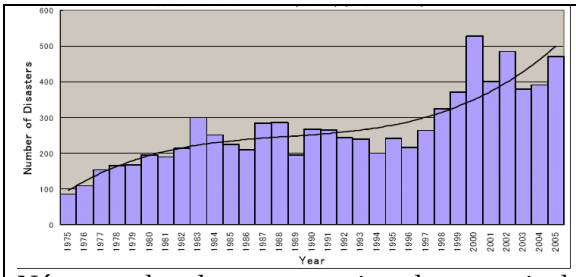
[1] 1 Ponencia presentada en el Congreso Geoprocesamiento 2007. Centro Nacional de Alta Tecnología, CONARE, 21,22 noviembre 2007. Costa Rica.

Introducción

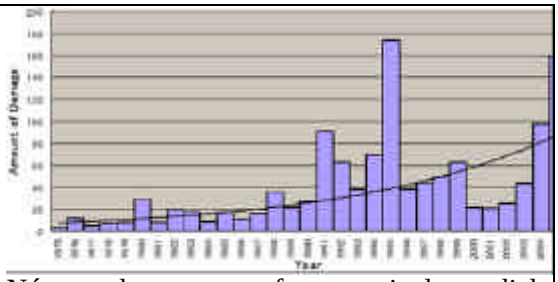
Los eventos hidroclimáticos extremos (Ej. precipitaciones intensas y prolongadas, sequías y avenidas extraordinarias) son parte del comportamiento natural del clima; sin embargo en las últimas tres décadas han recibido gran atención por parte de la población, la prensa y los gobiernos por los impactos desvastadotes que ocasiona en el paisaje, los ecosistemas, las personas, sus bienes y en la economía local y nacional (Costa Rica. sf.; Clarke and Rendell, 2006; Karl and Easterling,1999; Guha-Sapir, Hargitt and Hoyois, 2004; Khanal, Shrestha, and Ghimire, 2007; Xu, et.al., 2006; Wardlaw, Hulme, and Stuck, 1996.). Un evento climático extremo es aquel que tiene una baja frecuencia de ocurrencia en el tiempo en una localidad particular y por tanto entre uno y otro evento existen muchos años; sin embargo cuando ocurre causa un impacto severo en la naturaleza y/o en los bienes y servicios utilizados por los humanos (IPCC, 2001).

A media que los centros urbanos crecen con poco o ninguna planificación, ubicándose en áreas con alta vulnerabilidad natural, el riesgo de desastres ante eventos extremos aumenta (Easterling et al. 2000; Fonseca, 2007). Los impactos sociales y económicos de los eventos climáticos extremos afectan con mayor severidad a los grupos sociales más pobres del planeta y por tanto constituyen un obstáculo al desarrollo humano y una amenaza para el cumplimiento de los objetivos de Desarrollo del Milenio (Costa Rica. sf.; United Nations, 2007); especialmente en la región Centroamericana y del Caribe (Adamson, 2003). Se estima que el 85% de la población expuesta a terremotos, ciclones tropicales, inundaciones y sequías, vive en países cuyo desarrollo humano es medio ó bajo. En los últimos 30 años los eventos extremos han provocado pérdidas económicas anuales crecientes. Por ejemplo, cifras del PNUD indican que las perdidas crecieron 1.8 veces entre la década del 60 y 70; aumentaron a 1.8 veces entre el 70 y el 80 y finalmente en los 90 se triplicaron con respecto al 80; la mayoría de estas cifras corresponden a países desarrollados (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2004). El número de eventos y personas afectadas también ha aumentado en los últimos 30 años (Guha-Sapir, Hargitt and Hoyois, 2004) (Fig. 1).

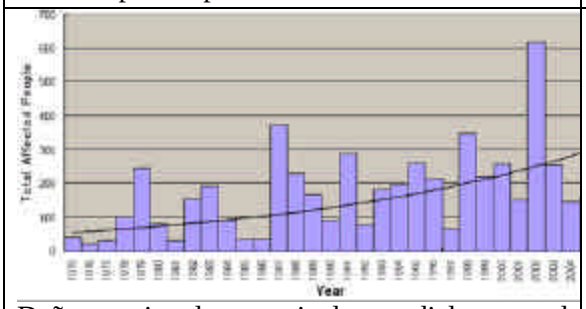
Hasta la fecha, la investigación realizada a nivel mundial indica que el comportamiento temporal y espacial de los eventos climáticos extremos es variable y que no es posible hacer afirmaciones o generalizaciones para regiones sin datos y menos aun sobre su tendencia futura (Brown, and Katz, 1995; Campos, s.f; Cavazos y Rivas, 2004; Clarke and Rendell, 2006; Ekström, et. al., 2005; Fonseca, 2007; Fowler, et. al., 2005; Fowler, and Kilsby, 2003; Karl and Easterling,1999; Gilleland and Katz, 2006; Wettstein and Mearns, 2002).



Número de desastres registrados a nivel mundial para el periodo 1975-2005.



Número de personas afectas a nivel mundial para el periodo 1975-2005 (Millones).



Daños estimados a nivel mundial para el periodo 1975-2005 (billones de dólares (US$).

Figura 12: Número de desastres, pérdidas económicas y número de personas afectadas entre 1975 y 2005. Fuente: http://www.em-dat.net/

Al analizar los datos anteriores, se debe tener en cuenta que los mismos subestiman el impacto de los eventos extremos en los países más pobres; ya que en los mismos solo se registran los impactos muy severos (Ej. Huracanes Mitch y Juana en Centro América) (Khanal, Shrestha, and Ghimire, 2007, United Nations, 2007). Esto significa que no existe certeza sobre los efectos reales de los eventos extremos. Por ejemplo, en Costa Rica, aún cuando existen algunos datos sobre los impactos de los eventos hidrometeorológicos extremos no existen series estadísticas de largo plazo ni estimaciones de costos sistémicos que permitan analizar con certeza el impacto de dichos eventos. Los costos en salud, educación, infraestructura, producción y servicios están subestimados o no se han estimado del todo. En las últimas tres décadas Centroamérica ha sido impactada por eventos importantes tales como El Niño 1982-1983 y 1997-1998, el huracán Mitch a finales de 1998 y la sequía en los años 2000 y 2001, los cuales han ocasionado cuantiosas pérdidas en vidas humanas y económicas (Adamson, 2003; Comité Regional de Recursos Hidráulicos, sf.).

La evidencia presentada en los párrafos anteriores indica que existe una tendencia hacia el aumento en la frecuencia e impacto de los desastres asociados a causas naturales a nivel mundial; por otro lado el calentamiento paulatino del planeta podría ocasionar otros efectos en la circulación atmosférica, oceánica y en los patrones de lluvia. Una de las preocupaciones de la comunidad científica y de los políticos es el posible incremento en la frecuencia y/o magnitud de las lluvias extremas; las cuales en presencia de poblaciones vulnerables podrían generar avenidas cada vez más severas y catastróficas (Emanuel, 2005; Frich, et.al. 2002; Greenpeace. 2007; Instituto Meteorológico Nacional,200; Kiladis and Diaz. 1989; Landsea, 2005; Lott, and Ross, 2006; Mccarthy, 2007; Solano, Retana y Villalobos, 2002).

Las crecidas (aumento en el nivel de agua en el cauce) forman parte del comportamiento natural del sistema hidrográfico de la cuenca y son el resultado de la combinación de condiciones de alta humedad en el suelo y lluvias abundantes y de larga duración asociadas a fenómenos climáticos tales como los frentes fríos, depresiones tropicales y en especial huracanes. Dichos eventos en presencia de personas, bienes o infraestructura vulnerable se convierten en un desastre, el cual a su vez ocasiona una emergencia que se traduce en pérdida de vidas, bienes e infraestructura (Easterling et al. 2000; Fonseca, 2007; Kaimowitz, 2005). Con frecuencia, la prensa, los grupos ambientalistas y los políticos asocian las inundaciones con la deforestación (legal e ilegal), la explotación de bosques (Kaimowitz, 2005; Osnos, Evan. 2006; Reuters Foundation. 2006) y el cambio climático (Doughton, Sandi, 2005; Geenpeace, 2007; The Seattle Times, 2005; Yunling, and Yiping, 2005) y en muy pocas veces se reconoce el papel que juega la falta de planificación urbana y la invasión de las riberas y planicies de inundación (Solano, Retana y Villalobos, 2002, Instituto Meteorológico, 2005). Por otro lado, a pesar del interés generalizado en el tema, existe poca evidencia científica sobre el rol del bosque y en general el uso-cobertura de la tierra en la magnitud y frecuencia de los avenidas extremas; así como sobre el rol que podrían jugar ante los escenarios de cambio climático. La evidencia en la literatura hidrológica indica que el bosque, y en general toda vegetación, ejerce un papel regulador sobre el ciclo hidrológico (Bruijnzeel, 1990; Bruijnzeel y Hamilton, 2000; Lee,1978; UN FAO and CIFOR, 2005); sin embargo en presencia de eventos hidrometeorológicos extremos es muy probable que su efecto mitigador sea mínimo.

El presente trabajo tiene dos objetivos, primero analizar la frecuencia y distribución espacio-temporal de las inundaciones registradas en Costa Rica entre 1970 y 2004 y segundo aportar al conocimiento de la relación bosque-inundaciones a través del análisis de la frecuencia e impacto de las mismas en la cuenca del río Matina durante el mismo periodo.

Métodos

Los registros de inundaciones analizados en el presente trabajo provienen de la base de datos DeSinventar (2005), la cual compila información de periódicos y de la Comisión Nacional de Emergencias. Los autores reconocen que los datos pueden tener algún sesgo tanto en el número de inundaciones como en sus impactos, especialmente en las décadas de los 70 y 80s. El proceso y análisis de los datos consistió en:

1. Nivel Nacional

a. Extracción de los registros clasificados como inundaciones o avenidas en la base de datos de DeSinventar publicada en el año 2005. Para los fines del presente documento se considera como un evento a aquella inundación reportada durante un día calendario. Por ejemplo, si en la base de datos se reportan cuatro sitios afectados por inundaciones durante un mismo día, entonces se considera que fue el mismo evento climático que ocasionó las inundaciones.
b. Unir los registros de inundaciones al mapa de distritos de Costa Rica utilizando como llave el código del distrito.
c. Análisis de los eventos por distrito, cuenca, década (1970-1979; 1980-1989, 1990-1999; 2000-2004) y mes.

2. Cuenca río Matina

a. Extracción de los eventos correspondientes a la cuenca del río Matina. Para esto se utilizó la base de datos preparada a nivel nacional y las localidades afectadas por cada evento.
b. Mapeo de pueblos y localidades afectadas por inundaciones.
c. Análisis de los eventos por década (1970-1979; 1980-1989, 1990-1999; 2000-2004) y mes.
d. Elaboración de mapas de cobertura forestal para los años 1979, 1986 y 1992 utilizando como referencia el mapa de bosques del año 2005 (Sanchez, et.al., 2006) e imágenes Landsat de los años 1979, 1986 y 1992.
e. Elaboración de mapa de pendiente a partir de modelo digital de elevación con una resolución de 50m de celda y elaborado utilizando curvas de nivel cada 20m.

Resultados y discusión

Inundaciones en Costa Rica: 1970-2004

El patrón observado en Costa Rica en cuanto al número de inundaciones y sitios afectados entre 1970 y 2004 fue muy similar al mundial (Fig. 2). En dicho periodo se registraron al menos 3146 localidades afectadas (DesInventar, 2005); de las cuales 1219 (38.7%) están ubicadas en el Gran Área Metropolitana (GAM), la cual alberga más del 50% de la población de Costa Rica. Los distritos con mayor número de inundaciones fueron: Limón (87), Siquirres (76), Matina (59), Alajuela (52), Desamparados (52), Corredor (46), Matama (45), San Sebastián (41) y Sixaola (41) (Fig. 3). Tanto el Gran Área Metropolitana (38.74%) como la vertiente del Caribe (26.4%, 832 registros) son los espacios geográficos que acumularon el mayor número de inundaciones.

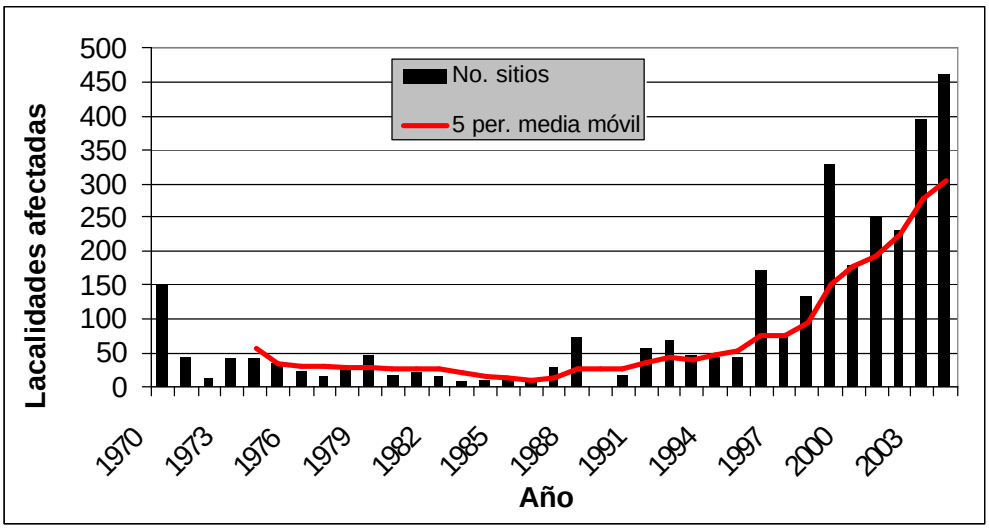


Figura 13: Localidades afectadas por inundaciones en Costa Rica (1970-2004). Fuente: Basado en datos de DesInventar, 2005.

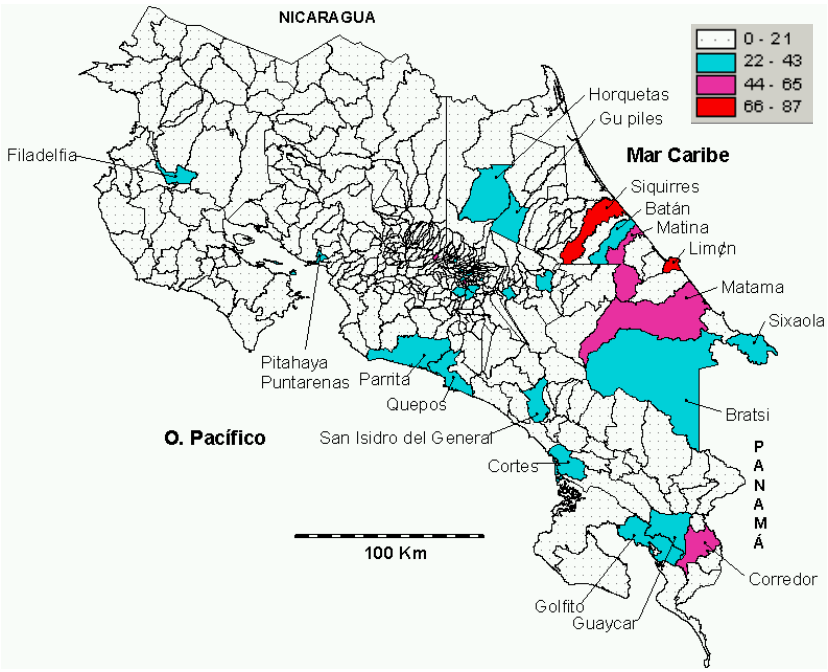


Figura 14: Frecuencia de inundaciones por distrito en Costa Rica (1970-2004). Fuente: Basado en datos de DesInventar, 2005.

En la década de 1970 se registraron 440 sitios impactados (14.0 %); dicha cifra se redujo a 200 (6.4 %) en la década del 80 y aumentó nuevamente a 989 (31.4 %) en la década del 90. Durante los años 2000 a 2004 se registraron 1517 (48.2%) localidades afectadas por inundaciones (Fig. 4); de las cuales el 36.7% (587) corresponden al Gran Área Metropolitana (GAM). Los meses con un mayor número de localidades afectadas por inundaciones son mayo (9%), agosto (12%), setiembre (17%), octubre (20%) y noviembre (11%) (Fig. 5). Dicha tendencia coincide, en términos generales, con el patrón de lluvias de Costa Rica, el cual se caracteriza por recibir la mayor cantidad de precipitación durante los meses de agosto-octubre en el Pacífico; junio a diciembre en la Zona Norte y Caribe Norte y julio, noviembre-enero en el caribe sur (Fig. 6). En dichos meses los suelos se encuentran saturados y por tanto se espera que un alto porcentaje de la lluvia se convierta en escorrentía, lo que ocasiona un aumento natural en el nivel de los ríos.

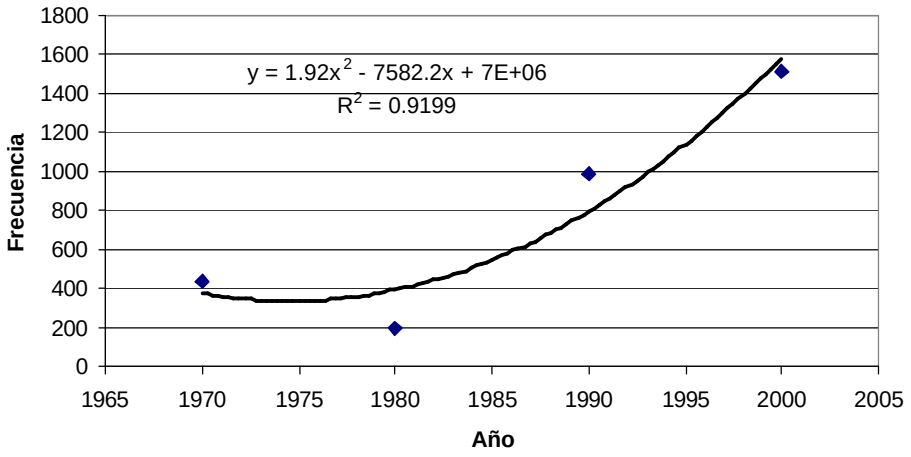


Figura 15: Frecuencia de inundaciones para las décadas 1970-1979; 1980-1989, 1990-1999 y 2000-2004. Basado en datos de DesInventar, 2005.

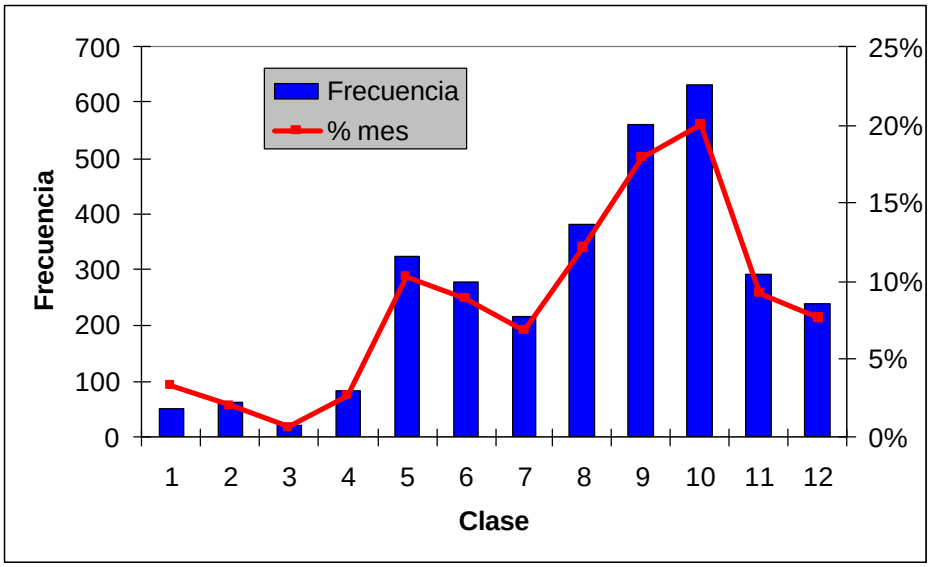


Figura 16: Frecuencia mensual de localidades afectadas por inundaciones entre 1970 y 2004. 1 (Enero) 12 (diciembre). Fuente: Basado en datos de DesInventar, 2005.

Las cuencas hidrográficas con una mayor recurrencia de inundaciones para el periodo 1970-2004 fueron Tempisque, Sarapiquí, Chirripó Atlántico, Reventazón-Parismina, Pacuare, Madre de Dios, Matina, Moín, Bananito, La Estrella, Sixaola, Esquinas, Naranjo y Parrita. (Fig. 7).

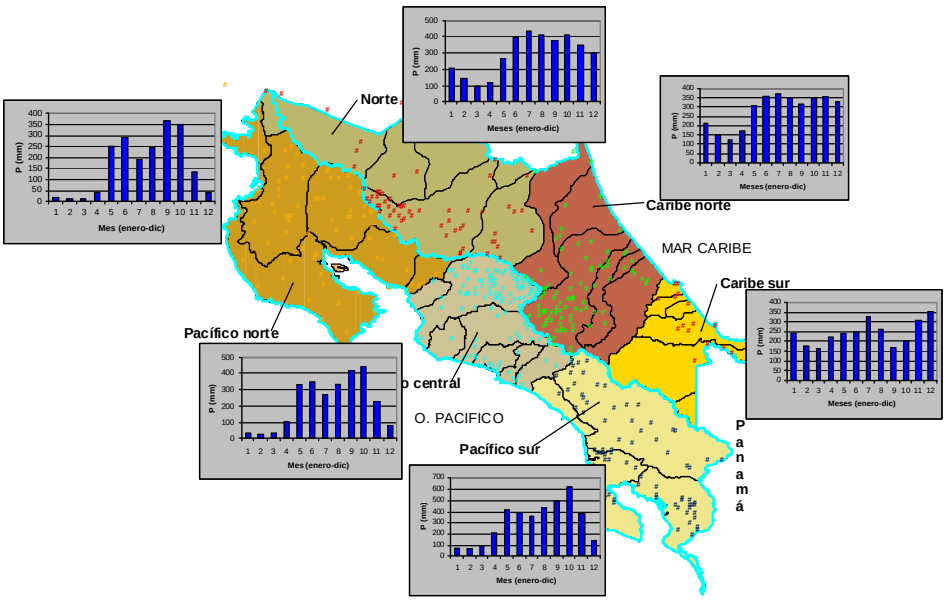


Figura 17: Distribución de la precipitación mensual (Enero-Diciembre) por vertientes y subvertientes de Costa Rica. Los puntos indican estaciones meteorológicas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de precipitación del Instituto Meteorológico Nacional.

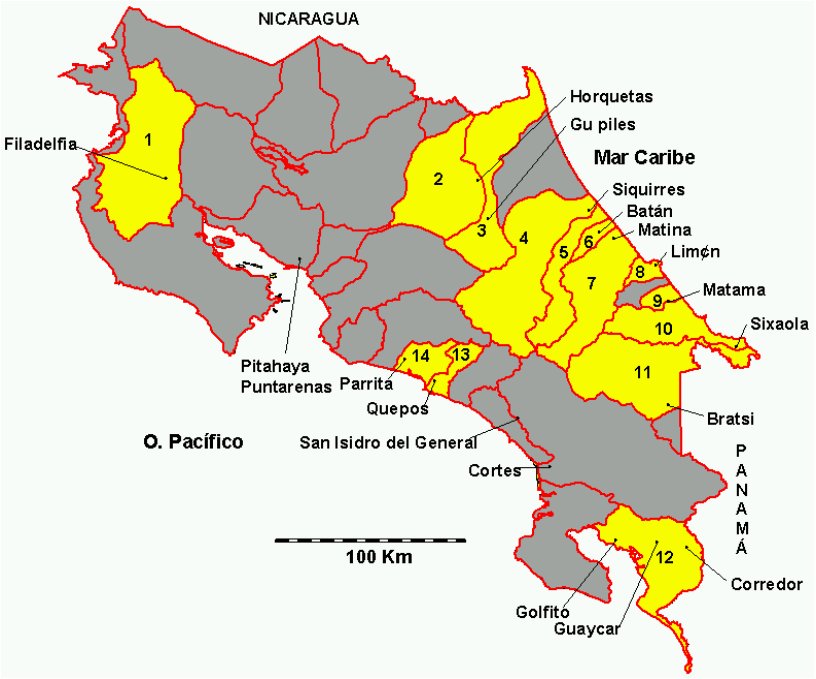


Figura 18: Cuencas hidrográficas con alta frecuencia de inundaciones en el periodo 1970-2005. 1-Tempisque, 2-Sarapiquí, 3-Chirripó Atlántico, 4-Reventazón-Parismina, 5-Pacuare, 6-Madre de Dios, 7-Matina, 8-Moín, 9-Bananito, 10-La Estrella, 11-Sixaola, 12-Esquinas, 13-Naranjo, 14-Parrita. Fuente: Basado en datos de DesInventar, 2005.

Cuenca del río Matina: Bosque e inundaciones en los últimos 34 años

En el caso de cuencas grandes (más de 1000 Km^2) es difícil establecer una relación directa entre eventos climáticos extremos e inundaciones (frecuencia, severidad, impactos) debido a la ausencia de redes hidrometeorológicas con una adecuada densidad de estaciones. En la mayoría de las inundaciones no es posible determinar la cantidad de lluvia recibida por la cuenca ni su distribución espacio-temporal. Otra limitante en cuencas grandes es su heterogeneidad geológica, edáfica, topográfica y de uso-cobertura del suelo.

La percepción aceptada entre la población, los políticos y algunos profesionales es que los bosques reducen significativamente y/o eliminan las avenidas en la cuenca (ACAN-EFE. 2001; Agencia EFE. Río de Janeiro. 2000; Calvez, 2004; Greenpeace. 2007; Jiménez, 2005; Kaimowitz, 2005; Osnos, Evan. 2006; Reuters Foundation. 2006). Esta generalización no distingue entre magnitud y frecuencia de las avenidas (Ej. avenida con un periodo de retorno de 10 años versus 100 años) ni entre la vulnerabilidad o exposición de los seres humanos o sus bienes al efecto de la avenida. Los datos analizados en la sección anterior demuestran que efectivamente en Costa Rica la frecuencia e impacto de las inundaciones han aumentado en los últimos 30 años y que dicho aumento coincide con la conversión de bosques a terrenos agrícolas y urbanos. Otro factor a considera es el aumento en la población y especialmente, en la proporción de asentamientos construidos en las riberas de los ríos y en las planicies de inundación. Un ejemplo típico de la combinación de dichas condiciones se hizo evidente con el paso del Huracán Mitch en Honduras y Nicaragua (Adamson, 2003). Sin embargo existe poca evidencia científica que permita explicar la severidad del evento en función de factores tales como la presencia/ausencia de bosque, el aumento en la población bajo riesgo, el incremento en número, duración y magnitud de eventos extremos, el cambio en el uso-cobertura de la tierra, la hidráulica del cauce y el tamaño y características de la cuenca.

Con el objetivo de proveer alguna evidencia empírica sobre el papel que juega el bosque en las avenidas/inundaciones se partió de la siguiente hipótesis: “En el largo plazo, la frecuencia de avenidas/inundaciones en una cuenca bajo cobertura forestal no debe mostrar un incremento significativo en el tiempo”. El corolario de la hipótesis planteada es que si la cuenca permanece bajo bosque entonces debemos observar el comportamiento natural de las avenidas. Es importante que el lector distinga entre el concepto de *avenida* o aumento de agua en el nivel natural de un río o arroyo y la *inundación* o acción y efecto de inundar. Normalmente una avenida en ausencia de infraestructura, bienes o seres humanos no es considerada como una inundación. Por ejemplo, una porción del bosque de la Amazonía permanece anegado hasta 10 meses al año, sin embargo no es noticia porque dicho evento no se considera una inundación. En este ambiente, la población local se ha adaptado a dichas condiciones construyendo casas flotantes o sobre pilotes. Un ejemplo, de esta adaptación en Costa Rica son la antiguas casas construidas sobre basas por los moradores de la Vertiente Caribe costarricense.

Para someter a prueba la relación bosque-avenidas-inundaciones se eligió la cuenca del río Matina porque al menos 80% se su área se ha mantenido bajo cobertura forestal desde la década del 70. La cuenca tiene un área de 1475 Km^2 y se ubica en el extremo sur del Caribe Norte de Costa Rica (Fig. 8). El río Chirripó drena la cuenca alta y media y los ríos Zent y Barbilla la cuenca baja. La confluencia de estos ríos forman el río Matina.

La cuenca se caracteriza por una topografía escarpada (pendientes superiores al 30 y 50%) en sus secciones media y alta (Fig. 8), y una abundante precipitación anual (3200 a 3600 mm), distribuida a lo largo de todo el año. Desde la década del 70 (y posiblemente antes) se han desarrollado actividades agropecuarias en las secciones media y baja de la cuenca; sin embargo las mismas nunca han superado el 18.5 % del área total de la cuenca. Por otro lado, la cobertura forestal se ha mantenido sobre el 81% durante el periodo de análisis (1970-2004) (Fig.9). Los principales poblados se encuentran en la parte baja de la cuenca y son los que sufren las inundaciones.

Las inundaciones asociadas al río Matina son de tipo ribereño y por tanto son el resultado del aumento paulatino del nivel del agua en el cauce que culmina con su desbordamiento y desplazamiento por la planicie de inundación. Este tipo de inundaciones, a diferencia de las repentinas, están asociadas a precipitaciones prolongadas que coinciden generalmente con suelos saturados y altos niveles de la tabla de agua. La descarga de pico (máximo nivel de agua alcanzado por el río) se observa normalmente después de uno o más días de lluvia y la recesión o vuelta del nivel del agua a su condición normal puede tardar desde horas hasta días (Xu, et. al., 2006).

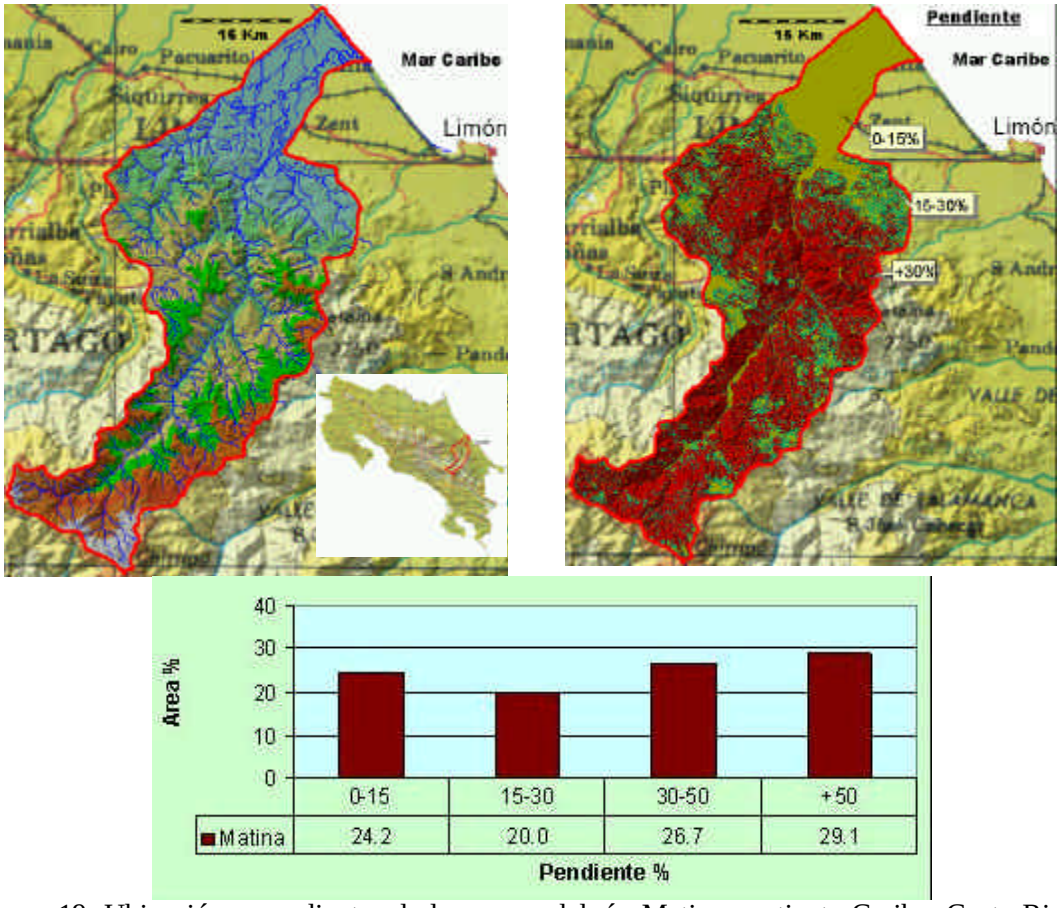


Figura 19: Ubicación y pendientes de la cuenca del río Matina, vertiente Caribe, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia.

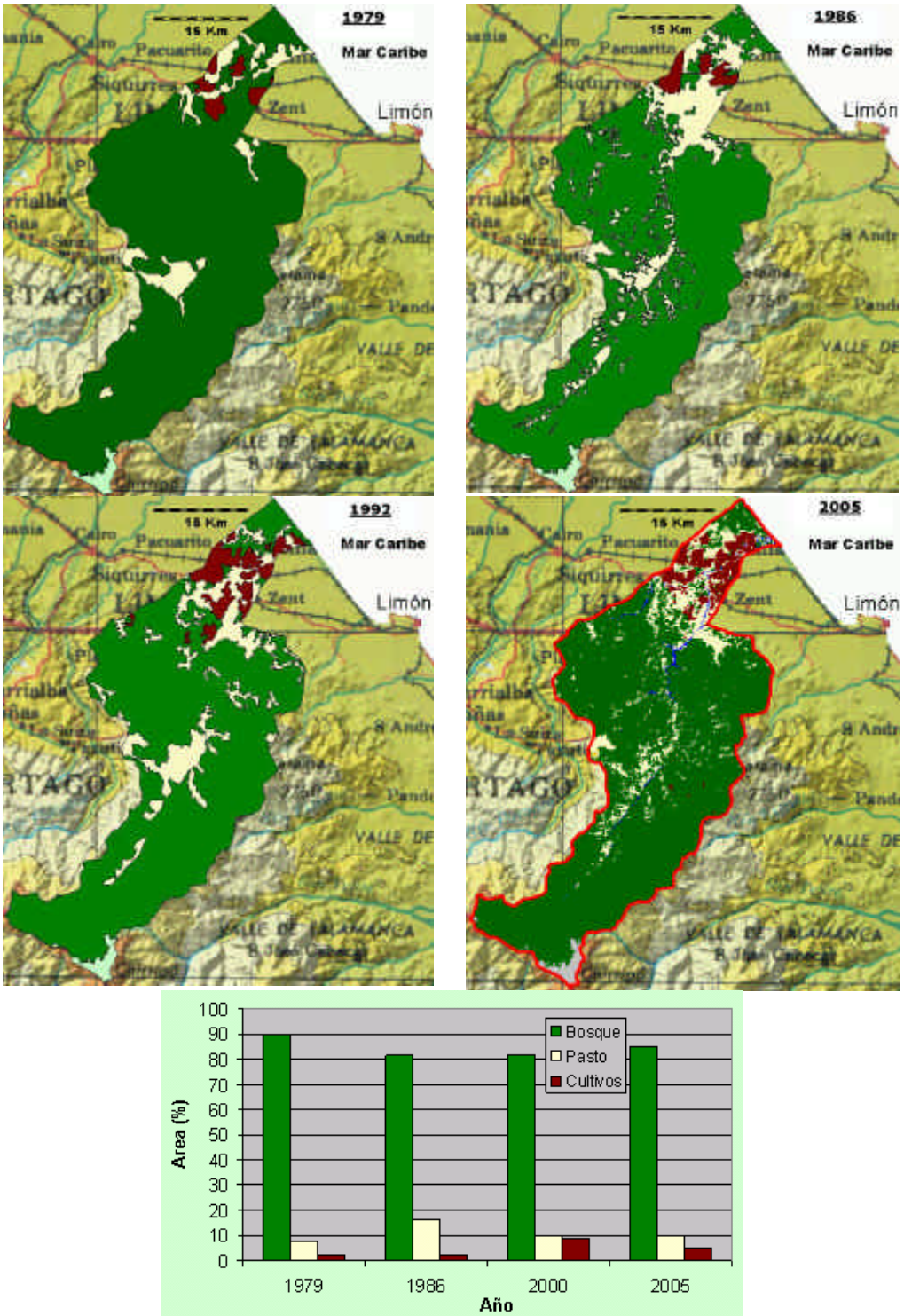


Figura 20: Cobertura forestal en la cuenca del río Matina, vertiente Caribe, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia y datos de Sánchez, 2006.

Entre las localidades afectadas en la sección cuenca baja están Matina, Margarita, Batán, Luzón, 4 millas, 7 millas, 23 millas, Estrada, Linea B, Corina, Bristol, Baltimore, Barbilla, La Esperanza, Ciudad Imas, Los Berros, Palestina y Rosa Azul (Fig. 10).

Figura 21: Localidades afectas por inundaciones en la cuenca baja del río Matina (1970-2004). La línea roja indica el límite de la cuenca. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de DeSinventar, 2005.

En el periodo 1970-2004 se registraron al menos 88 localidades inundadas y 46 eventos climáticos que causaron dichas inundaciones; la tasa media de afectación por evento fue de 1.9 sitios. Los datos muestran una tendencia al aumento tanto en el número de sitios afectados como de inundaciones a partir de la década del 70, con la excepción de la década del 80, la cual mostró un reducción importante en ambas variables (Fig. 11). Si observamos la relación entre sitios afectados por evento, tenemos que en la década del 70 un evento afectó 1.45 sitios; dicho valor aumentó a 2.00 en la década del 80, a 2.54 en la década del 90 y se redujo nuevamente a 1.72 en el periodo 2000-2004 (Fig. 12). La cuenca no tiene estaciones meteorológicas en sus secciones media y alta y por tanto no es posible determinar la magnitud de la lluvia que ocasionó dichas inundaciones. Sin embargo basado en el estudio de Aguilar et.al (2005) se puede afirmar que no se detectó ningún patrón de aumento en la cantidad de lluvia máxima (percentiles 95 y 99) en la cuenca baja; desafortunadamente no existen datos para la cuenca media y superior.

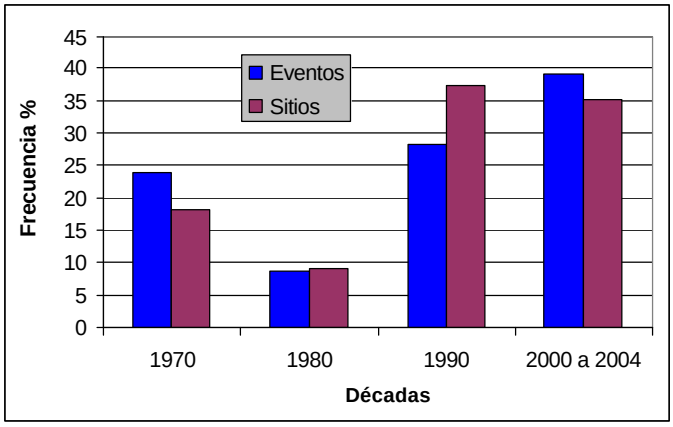


Figura 22: Localidades e inundaciones registradas en las décadas del 70, 80, 90 y 2000-2004 en la cuenca del río Matina, vertiente Caribe, Costa Rica. Fuente: Basado en datos de DeSinventar, 2005.

El número de damnificados aumentó exponencialmente tanto por inundación como por sitios afectados entre 1970 y el 2004 (Fig. 12); sin embargo la tasa de damnificados por evento y sitio cambió a partir de la década del 80. Durante las décadas del 70 y 80 se registraron 22.1 y 22.5 damnificados por evento, respectivamente; en tanto que durante la década del 90 y del 2000 al 2004 dicho valor cambió a 72.1 y 69.8, respectivamente. La tendencia observada por sitio afectado fue similar aunque con una pendiente menor y sin una tendencia a la disminución como sí se observó en el número de damnificados por evento. La evidencia indica que el número de damnificados por sitio tiende a aumentar con el tiempo aunque el número de damnificados por inundación parece que tiende a disminuir ligeramente a partir del año 2000. Una posible explicación para dicha tendencia es el aumento en el número de habitantes expuestos a las inundaciones tanto por evento como por sitio afectado y a una mejora en las medidas de prevención implementadas por la comunidades.

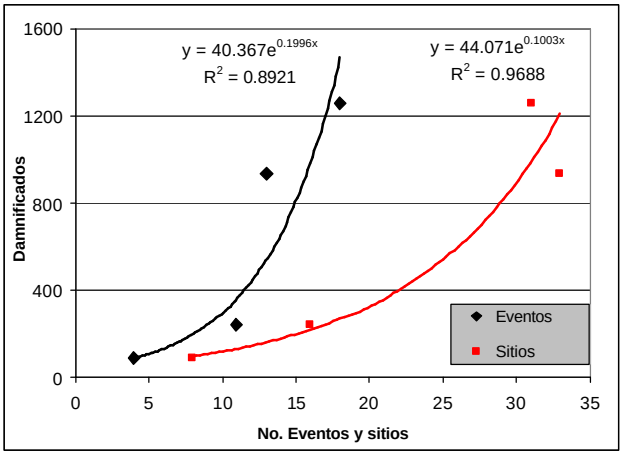


Figura 23: Damnificados en función de sitios e inundaciones para las décadas del 70, 80, 90 y 2000-2004 en la cuenca del río Matina, vertiente Caribe, Costa Rica. Fuente: Basado en datos de DeSinventar, 2005.

El análisis realizado hasta el momento permite afirmar que en la cuenca baja del río Matina se ha experimentado un aumento significativo en el número de inundaciones, de sitios afectados y de damnificados durante el periodo 1970-2004. Sin embargo como puede observarse en el la figura 13 la cobertura forestal de la cuenca no cambió significativamente entre 1970 y el año 2005.

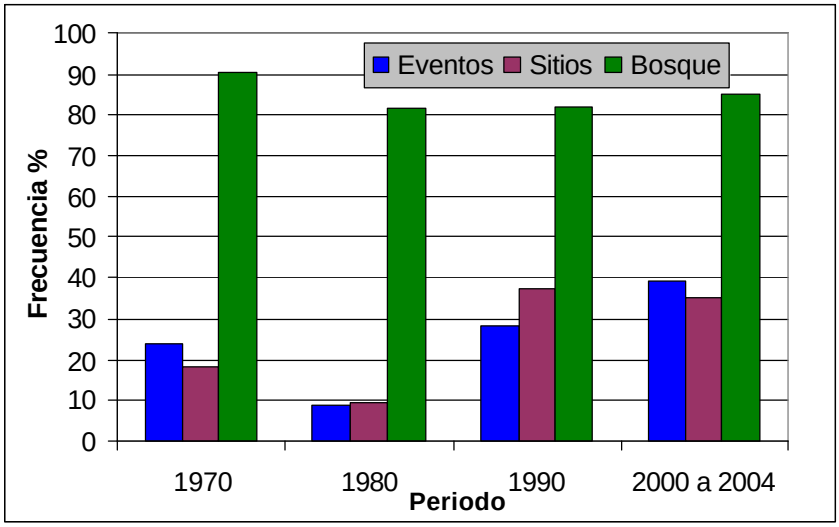


Figura 24: Cobertura forestal e inundaciones en la cuenca baja del río Matina. 1970-2004. Fuente: Basado en datos propios y registros de DesInventar, 2005.

La figura 10 permite apreciar que los poblados afectados por inundaciones se encuentran en zonas con elevaciones inferiores a 10 msnm y por tanto su vulnerabilidad es muy alta a cualquier aumento en el nivel del agua del cauce del río Matina. Otro factor a considerar es que la cuenca recibe en promedio por año entre 3200 y 3600 mm de lluvia, con una tendencia a incrementarse con la elevación (Fig.14). La precipitación mensual presenta sus máximos en setiembre, octubre y noviembre, con más de 300 mm mensuales en la parte alta y media de la cuenca y en noviembre y diciembre en la parte baja, con 380 y 425mm, respectivamente. Esto explica en parte la alta frecuencia de inundaciones registradas en el mes de diciembre (Fig. 14).

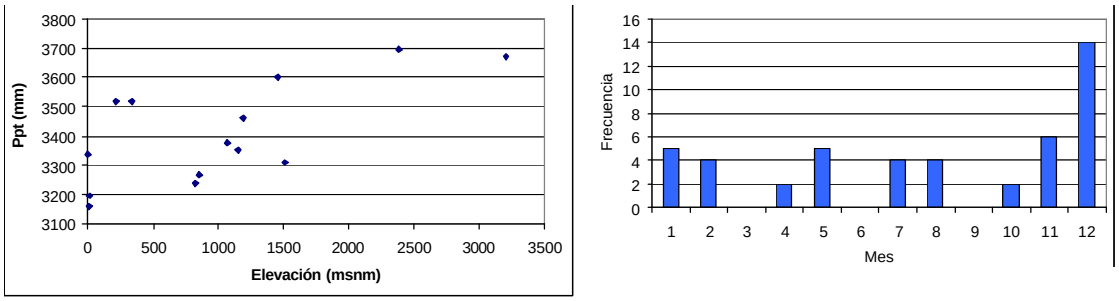


Figura 25: Relación de precipitación media anual con la elevación y distribución mensual de las inundaciones. 1 (Enero) 12 (diciembre). Fuente: Basado en datos de DesInventar, 2005 y estimación propia de precipitación para la cuenca.

Los datos analizados permiten afirmar que una cobertura forestal de 80 a 90% en la parte alta y media de la cuenca no fue suficiente para eliminar las inundaciones en la cuenca baja del río Matina y los impactos sobre personas, bienes, infraestructura y servicios. Las avenidas (incluidas las extraordinarias) son parte del comportamiento hidrológico normal de la cuenca ante lluvias de larga duración, intensidad y/o extensión (Bruijnzeel, 1990, 2004).

Brath, Montanari y Moretti (2006) basados en simulación hidrológica y mediciones de campo, realizadas en la cuenca del río Samoggia (178 km2, Montes Apeninos, Italia), concluyó que la sensibilidad del régimen de crecidas a cambios en el uso-cobertura del suelo decrece al aumentar los periodos de retorno; sin embargo el autor concluye que al considerar el valor de las descargas de pico con periodos de retorno entre 10 y 200 años, los cambios en el uso-cobertura del suelo parecen tener un impacto importante. Por otro lado, datos para la región de Basilicata-Italia, indican que durante los últimos 50 años se ha observado una reducción anual en el número de eventos extremos en la región central y oeste del Mediterráneo, la cual se explica por cambios en la fuerza de la Oscilación del Atlántico Norte. La degradación del suelo y los problemas asociados a las inundaciones y deslizamientos se han reducido debido a la presencia de inviernos más secos y a la mejora en las actividades de mitigación de amenazas (Clarke and Rendell, 2006).

El proceso de escorrentía superficial fue conceptualizado por muchos años como un balance entre el agua que llega al suelo (Ej. riego, lluvia) a una determinada intensidad y la capacidad de infiltración de sustrato. Desde esta perspectiva, el proceso estaba controlado por la capacidad de infiltración del suelo. Horton (1933) es considerado como un pionero en el estudio de este proceso y por tanto a este tipo de escorrentía se le conoce como “escorrentía Hortoniana” o “escorrentía superficial por exceso de infiltración”; el término enfatiza el hecho de que la escorrentía superficial ocurre cuando la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo. El proceso explica el aumento de descarga en los cauces en sitios áridos (presencia de escasa vegetación, suelos impermeables), áreas urbanas, terrenos irrigados, y en general durante tormentas de muy alta intensidad. Sin embargo, la escorrentía Hortoniana no explica la presencia de “flujo rápido” en cuencas de zonas húmedas donde la capacidad de infiltración del suelo es superior a la intensidad media de la lluvia. En presencia de suelos con vegetación leñosa (Ej. arbustos, bosque) la conductividad hidráulica estimada en el laboratorio es hasta 10 veces menor comparada con la observada en la realidad debido a la presencia de rutas de flujo preferencial en el suelo formadas por micro canales (Ej. túneles de gusanos y raíces muertas). Por tanto, solo las tormentas mas intensas en la estación lluviosa podrían generar escorrentía Hortoniana (Steenhuis, et. al., 2004). En regiones húmedas, la descarga es frecuentemente generada por pequeñas áreas de la cuenca que se saturan por completo. Una vez saturadas, cualquier precipitación (sin importar su intensidad) se convierte en escorrentía. Bajo estas condiciones, la predisposición de un área a generar escorrentía es prácticamente independiente de la intensidad de la lluvia. En tanto que, la cantidad total de lluvia y las características del paisaje (Ej. espacio poroso disponible para almacenar agua), área de aportes y la topografía local son las características que determinarán si el área genera o no escorrentía. Al continuar la precipitación, el área saturada se expande, incrementándose el área que genera escorrentía. A este proceso se le conoce como “fuente de área variable” (FAV) y fue acuñado por Hewlett y Hibbert (1967) a partir de experimentos realizados en la Estación Hidrológica de Coweeta, USA.

En el caso de la cuenca del río Matina, el 63% de las inundaciones ocurrieron en los meses de noviembre, diciembre y enero; periodo en el cual la mayor parte de los suelos se encuentran saturados y por tanto la respuesta de la cuenca ante la lluvia no dependerá de la capacidad de infiltración del suelo o de la cobertura vegetal sino más bien de las oportunidades de almacenamiento del sustrato y el cauce (Xu, et. al., 2006). O sea, aun cuando se mantenga intacto el mantillo, suelo mineral y la cobertura forestal, el efecto regulador del bosque y del mantillo forestal tienden a desaparecer (Bruijnzeel, 2004). Bajo estas circunstancias el suelo y el bosque de la cuenca se comportan como una gigantesca "esponja saturada", la cual desplaza eficientemente el agua de lluvia desde las laderas de la cuenca hasta el cauce (Calder, 2002).

El comportamiento hidrológico de la cuenca es complejo y está condicionado por aspectos tales como diferencias en topografía, fisiografía, suelos, tamaño de la cuenca y las características de la tormenta (duración, intensidad, cantidad, distribución espacial y temporal) (Hamilton and King, 1983; Harden, 1993; Moore and Wondzell, 2005; Wilk, Andersson and Plermkamon, 2001; Steenhuis, et. al., 2004; Williams, Fisher and Melack, 1997a y 1997b). El bosque tiene un efecto regulador limitado frente a tormentas de gran intensidad y duración (Ej. lluvias causadas por huracanes, tormentas tropicales o temporales). Bajo estas condiciones, la lluvia satura rápidamente la capacidad de almacenamiento de la vegetación y un alto porcentaje de la misma (usualmente del orden de un 95% o más) alcanza el piso del bosque. El papel que juega el bosque como elemento regulador consiste en proveer las condiciones óptimas para evitar la erosión, favorecer la infiltración y posterior percolación del agua (Anderson, Hoover, and Reinhart, 1976; Bosch and Hewlett, 1982; Bruijnzeel, 1990; Kiersch, 2000). El efecto regulador del bosque es limitado en cuencas de gran tamaño pues conforme aumenta el área de la cuenca también aumenta el tiempo requerido para que el agua llegue a los cauces de orden superior; los cuales son los que generalmente se desbordan y generan inundaciones.

Dada la topografía de la cuenca del río Matina y su abundante precipitación anual y mensual, es muy posible que si se removiera el bosque en la sección alta y media de la cuenca se observaría una reducción en los tiempos de concentración y un aumento en la respuesta hidrológica de la cuenca; así como en la descarga de pico. Bajo este escenario es muy posible que las inundaciones cambien de paulatinas o ribereñas a repentinas y que el impacto sea más severo en los poblados que actualmente son inundados.

Otros factores que pueden explicar el incremento en las inundaciones en la Costa Caribe son el aumento en el nivel del cauce como resultado del retroceso del agua al unirse dos ríos (Ej. la confluencia de los ríos Chirripó, Zent y Barbilla) y cambios en la pendiente de la planicie de inundación como resultado del terremoto ocurrido el 22 de abril de 1991 en el Caribe costarricense, el cual dio como resultado el levantamiento de la costa Caribe. Estos eventos no parecen aislados, ya que estudios realizados por investigadores de la Escuela Centroamericana de Geología indican que la costa Caribe de Costa Rica se ha estado levantando y probablemente seguirá levantándose a consecuencia de terremotos originados en las fallas inversas del litoral Caribe (Para mayores detalles ver (http://www.ucr.ac.cr/mostrar_noticia.php?ID=513). Finalmente, posiblemente la mejor explicación es que las comunidades y los gobiernos han construido sus casas e infraestructura en la planicie de inundación del río.

Una de las principales funciones del bosque es mantener la tasa de erosión, transporte y producción de sedimentos en sus niveles naturales, los cuales son significativamente menores

que aquellos observados en cuencas modificadas por acciones antrópicas (Bruijnzeel, 2004, Harden, 2001). Los sedimentos y otros detritus sólidos transportados por el cauce, forman pequeñas represas que al ceder a la fuerza de la corriente aumentan considerablemente su capacidad erosiva, fuerza hidráulica y su poder destructivo; convirtiéndose en una de las principales fuentes de daños a la infraestructura, viviendas y seres humanos.

En la vertiente Caribe, la mayoría de las inundaciones están asociadas a los temporales del Atlántico los cuales son ocasionados por perturbaciones atmosféricas que afectan la costa Caribe y que producen lluvias y lloviznas por periodos continuos de 1 hasta 15 días en los meses de diciembre y enero. Este fenómeno es ocasionado por la incursión de los frentes fríos del hemisferio norte (invierno) en el Golfo de México o a lo largo de la costa este de los Estados Unidos, creando zonas de alta presión (anticiclones) sobre el Caribe Norte. Este anticiclón se desplaza hacia el este con vientos fríos y cargados de humedad que rotan de norte a sur (en el sentido de las manecillas del reloj) fortaleciendo los vientos alisios que descargan su humedad como lluvia en la vertiente Caribe de Centro América. Durante los meses de mayo-octubre también pueden presentarse temporales en el Caribe costarricense, sin embargo en este caso son generados por perturbaciones temporales en las Ondas del Este, un sistema de vientos que se mueven normalmente en la alta atmósfera y que generan lluvias persistentes en el Caribe (Amador, 1988; Mora y Amador, 1998; Zárate,1977).

Conclusiones

1. A nivel mundial, la investigación realizada hasta la fecha indica que el comportamiento espacio-temporal de los eventos hidroclimáticos es variable y que no es posible hacer afirmaciones o generalizaciones sobre su comportamiento en regiones sin datos y menos aun sobre su tendencia futura.

2. Las avenidas son parte del comportamiento natural de la cuenca; sin embargo en las últimas tres décadas su frecuencia e impacto económico han aumentado y por esta razón han recibido gran atención por parte de la población, la prensa y el gobierno de Costa Rica.

3. Entre 1970 y 2004 se registraron al menos 3146 localidades afectadas por inundaciones en Costa Rica; de éstas 1219 (38.7%) se ubican en el Gran Área Metropolitana (GAM), la cual alberga más de la mitad de la población de Costa Rica.

4. Para el periodo 1970-2004, los distritos con mayor número de inundaciones fueron: Limón (87), Siquirres (76), Matina (59), Alajuela (52), Desamparados (52), Corredor (46), Matama (45), San Sebastián (41) y Sixaola (41).

5. El Gran Área Metropolitana (38.74%) y la vertiente Caribe (26.4%) son los espacios geográficos que acumularon el mayor número de inundaciones.

6. En la década de 1970 se registraron 440 sitios impactados (14.0 %); dicha cifra se redujo a 200 (6.4 %) en la década del 80 y aumentó nuevamente a 989 (31.4 %) en la década del 90. Durante los años 2000 a 2004 se registraron 1517 (48.2%) localidades afectadas por inundaciones; de las cuales el 36.7% (587) corresponden a zonas urbanas.

7. Los meses con un mayor número de inundaciones son mayo (9%), agosto (12%), setiembre (17%), octubre (20%) y noviembre (11%), lo cual coincide con los meses de mayor precipitación en Costa Rica.

8. A nivel nacional, las cuencas hidrográficas con una mayor recurrencia de inundaciones para el periodo 1970-2004 fueron Tempisque, Sarapiquí, Chirripó Atlántico, Reventazón-Parismina, Pacuare, Madre de Dios, Matina, Moín, Bananito, La Estrella, Sixaola, Esquinas, Naranjo y Parrita.

9. Entre 1970 y el 2004 se registraron al menos 88 localidades inundadas y 46 eventos climáticos que causaron dichas inundaciones en la cuenca del río Matina. La tasa media de afectación por evento fue de 1.9 sitios. Los datos muestran una tendencia al aumento tanto en el número de sitios afectados como de inundaciones a partir de la década del 70, con la excepción de la década del 80, la cual mostró un reducción importante en ambas variables.

10. Entre los poblados afectadas en la cuenca baja del río Matina están Matina, Margarita, Batán, Luzón, 4 millas, 7 millas, 23 millas, Estrada, Linea B, Corina, Bristol, Baltimore, Barbilla, La Esperanza, Ciudad Imas, Los Berros, Palestina y Rosa Azul.

11. El número de damnificados aumentó exponencialmente tanto por inundación como por número de sitios afectados entre 1970 y el 2004; sin embargo la tasa de damnificados por evento y sitio cambió a partir de la década del 80. Durante las décadas del 70 y 80 se registraron 22.1 y 22.5 damnificados por evento, respectivamente; en tanto que durante la década del 90 y del 2000 al 2004 dicho valor cambió a 72.1 y 69.8, respectivamente.

12. En la cuenca del río Matina se experimento un aumento considerable en el número de inundaciones, sitios afectados y número de damnificados entre 1970 y el 2004. Sin embargo la cobertura forestal de la cuenca no cambió significativamente entre 1970 y el año 2005; manteniéndose en todo momento sobre el 80%. La cobertura forestal en la parte alta y media de la cuenca no fue suficiente para eliminar las inundaciones en la cuenca baja.

Agradecimientos. El presente trabajo se realizó gracias al apoyo del contrato INCO-CT2004-510739. EPIC-FORCE. Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt. Los autores agradecen al proyecto DesInventar por suministrar los datos sobre desastres en Costa Rica; también se agradece a Arturo Sánchez (U. de Alberta, Canadá y FONAFIFO) por permitir el uso de los datos de cobertura forestal de Costa Rica del año 2005. Se agradece al Dr. James Bathurst de la Universidad de NewCastle Upon Tyne por invitarnos a participar en este proyecto.

Referencias

ACAN-EFE. 2001. Defensa civil de Nicaragua vigila ríos del Caribe ante eventuales inundaciones. Lunes 13 de agosto, 2001 11:35:00 (Hora local).
http://www.nacion.com/ln_ee/2001/agosto/13/ultima6.html

Adamson Badilla Marcos. Desastres en Centroamérica: una ancla para el desarrollo humano sostenido y una agenda para estrategia de prevención. Centro de Estudios Económicos y Ambientales CIESA. Presentando en el Foro Mitch +5 Diciembre, 2003. 17p.

Agencia EFE. Río de Janeiro. 2000. Tala en Amazonia puede alterar clima en hemisferio norte Deforestación sin piedad. http://www.nacion.com/ln_ee/2000/agosto/13/mundo10.html

Aguilar et.al, 2005.Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. Journal of Geophysical Research, Vol. 110:D23107.

Amador, J. A., 1998. A climate feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos,5(2).

Anderson, H. W., Hoover, M.D. and Reinhart, K.G. 1976. Forests and water: effects of forest management on floods, sedimentation, and water supply. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Sation. USDA Forest Service. General Technical Report PSW-18. 11p.

Bosch, J.M., Hewlett, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. J. Hydrol. 55, 3–23

Brath, Armando, Alberto Montanari and Moretti, Greta. 2006.Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty). Journal of Hydrology Volume 324, Issues 1-4:141-153.

Brown, B.G. and Katz, R.W., 1995: Regional analysis of temperature extremes: Spatial analog for climate change?, J. of Climate 8:108–119.

Bruijnzeel, L. A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems and Environment. 104:185-228.

Bruijnzeel, L. A. 1990. Hydrology of tropical moist forest and effects of conversion: A state of knowledge review. UNESCO, Paris, and Vrije Universiteit, Amsterdam.

Calder, 2002. Forest and hydrological services: reconciling public and science perceptions. Centre for Land Use and Water Resources Research. University of Newcastle upon Tyne. UK. 62p. http://www.tropenbos.nl/files/Verweij/011Calder.pdf

Calvez, Manny. 2004. Philippines: NE Mayor vows to get rid of illegal logging in 90 days. 2004, Philippine Star. Date: December 6, 2004. The Philippine Star. http://www.illegal-logging.info/item_single.php?item=news&item_id=584&approach_id=

Cavazos, Teresa y Rivas, David. 2004. Variability of extreme precipitation events in Tijuana, Mexico. Climate Research. Vol. 25: 229–243: 229-243.

Comité Regional de Recursos Hidráulicos.sf. Eventos extremos de origem hidrometeorológica. Agua y clima Nesws Letter. http://www.aguayclima.com/clima/extremosclimaticos.htm

Clarke, M. L. and Rendell, H. M. 2006. Hindcasting extreme events: the occurrence and expression of damaging floods and landslides in Southern Italy. Land Degradation & Development VoL: 17: NO: 4: 365-380. 2006

Campos, Max. s.f. Cambio Climático En Centroamérica. Secretario Ejecutivo, Comité Regional Recursos Hidráulicos (CRRH) – Sistema de la Integración Centroamericana.(CCAD). http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/redica/maxor.pdf

Comité Regional de Recursos Hídricos. Eventos extremos de origen hidrometeorológico. http://www.aguayclima.com/clima/extremosclimaticos.htm

Costa Rica. sf. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). Impacto directo de los desastres naturales declarados en Costa Rica: 1988-2001. Sistema de Indicadores sobre Desarrollo Sostenible (SIDES). http://www.mideplan.go.cr/sides/ambiental/32-1.htm

DesInventar, 2005. Base de datos de desastres. http://www.desinventar.org/desinventar.html.

Doughton, Sandi. 2005. The truth about global warming. Seattle Times. Tuesday, October 11, 2005 - Page updated at 01:23 PM. http://seattletimes.nwsource.com/html/nationworld/2002549346_globewarm11.html

Emanuel, K.A. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature, 436 (4-August2005): 686-688.

Easterling D.R, et.al. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. Bull Am Meteorol Soc 81:417–425

Ekström, M., Fowler, H.J., Kilsby, C.G., and Jones, P.D., 2005: New Estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies. J. Hydrology 300:234–251.

Fonseca, Pablo. Q. 2007. Cambio climático producirá sequías e inundaciones aquí. Noticias Aldea Global. La Nación Digital. Pablo Fonseca Q. pfonseca@nacion.com. http://www.nacion.com/ln_ee/2007/agosto/14/aldea1199145.html

Fowler, H. J. and Kilsby, C. G. 2003. A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. International Journal of Climatology. VoL. 23. N0. 11:1313-1334.

Fowler, H.J., Ekstr¨om, M., Kilsby, C.G., and Jones, P.D., 2005: New Estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 1. Assessment of control climate. J. Hydrology 300:212–233.

Frich1, P. et.al. 2002.Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research, Vol. 19: 193–212.

Guha-Sapir., D. Hargitt, D. Hoyois. 2004. Thirthy years of natural disasters 1974-2003: The numbers, Presses Universitaires de Louvain: Louvain-la Neuve. http://www.em-dat.net/publications.htm

Guha-Sapir D., Below R. 2002. Quality and accuracy of disaster data: A comparative analyse of 3 global data sets. Working paper prepared for the Disaster Management facility, World Bank, Brussels CRED, 2002. [ID n191] http://www.em-dat.net/publications.htm

Gilleland, Eric and Katz, Richard W. 2006. Analyzing seasonal to interannual extreme weather and climate variability with the extremes toolkit. Research Applications Laboratory, National Center for Atmospheric Research. http://www.assessment.ucar.edu/pdf/Gilleland2006revised.pdf.

Gilleland, E. and Katz R.W., 2005: Tutorial for The Extremes Toolkit: Weather and Climate Applications of Extreme Value Statistics, http://www.assessment.ucar.edu/toolkit.

Greenpeace. 2007. Group: Logging, global warming to trigger more floods. January 31, 2007. http://www.abs-cbnnews.com/storypage.aspx?StoryId=26513

Harden, C. P. 1993. Land use, soil erosion, and reservoir sedimentation in an Andean drainage basin in Ecuador. Mountain Research and Development, 13(2): 177-184.

Hamilton, L. S; King, P.N. 1983. Tropical Forested Watersheds Hydrologic and Soils Response to Major Uses or Conversions. West View Press, Boulder, Colorado. USA. 168p.

Hewlett J D and Hibbert A R 1967. Factors Affecting the Response of Small Watersheds to Precipitation in Humid Regions. *In*: Sopper WE and Lull HW (eds). Forest Hydrology, pp. 275–290. Oxford, UK: Pergamon Press.

Instituto Meteorológico Nacional. 2005. Vulnerabilidad Actual de la zona noroccidental del Valle Central de Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía. San José, Costa Rica Marzo 2005. 57p.

Instituto Meteorológico Nacional. 2000. Primera comunicación nacional ante la convención marco de cambio climático. Ministerio del Ambiente y Energía. 116p.

IPCC. 2001. Climate Change 2001:Working Group I: The Scientific Basis. Appendix I - Glossary. p.790. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/pdf/TAR-APPENDICES.PD

Jiménez, Quírico. 2005. Menos bosques, más inundaciones. El precio de la tala es muerte y destrucción. http://www.nacion.com/ln_ee/2005/enero/17/opinion5.html

Kaimowitz, David. 2005. Logging and Floods: A Watertight Argument? Arborvitae. No. 27: p.10. . http://www.panda.org/downloads/forests/arborvitae27.pdf

Karl T R, Easterling DR.1999. Climate extremes: selected review and future research directions. Clim Change 42: 309–325.

Khanal, N. R., Shrestha, M and Ghimire, M. L. 2007. Preparing for Flood Disaster: Mapping and Assessing Hazard in the Ratu Watershed, Nepal . The International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD).
http://books.icimod.org/index.php/downloads/publication/134

Kiersch, Benjamín. 2000. Impactos del uso de la tierra sobre los recursos hídricos: una revisión bibliográfica. Dirección de Fomento de Tierras y Aguas. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 12p.

Kiladis, G. y H. F. Diaz. 1989. Global climatic anomalies associated with extremes of the Southern Oscillation. Journal of Climate, 9, p.1069-1090.
http://ams.allenpress.com/archive/1520-0442/2/9/pdf/i1520-0442-2-9-1069.pdf

Landsea, C.W., 2005. Hurricanes and Global Warming. Nature, 438 (29 December 2005): E11-12.

Lee, Richard. Forest microclimatology. 1978. New York, Columbia University Press. 276 p.

Lott, N., and Ross. T. 2006. Tracking and evaluating U.S. billion dollar weather disasters, 1980-2005. 86th AMS Annual Meeting, 29 January - 2 February 2006, Atlanta, Georgia. American Meteorological Society, Boston, MA, (1.2), 7 p.

Mccarthy, Michael. 2007. "Why 'extreme events' are likely to become the norm". Independent, The (London). Jun 26, 2007. FindArticles.com. 10 Oct. 2007.
http://findarticles.com/p/articles/mi_qn4158/is_20070626/ai_n19321249

Moore, Dan. R. and S.M. Wondzell. 2005. Physical Hydrology and the Effects of Forest Harvesting in the Pacific Northwest: A Review. Journal of the American Water Resources Association Volume 41, Number 4, August 2005, page 753-0784

Mora, Ileana y Amador, Jorge, 2000. EL ENOS, el IOS y la corriente en chorro de bajo nivel en el oeste del Caribe. Top. Meteor. Oceanog., 7(1):1-20.

Osnos, Evan. 2006. The hidden cost of your hardwood floor. The demand for Chinese goods is driving destructive logging around the globe. Tribune special report. December 18, 2006. http://www.chicagotribune.com/news/specials/chi-china-special,0,6789511.special

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. La reducción de riesgos de desastres: Un Desafío para el desarrollo, un informe mundial.. Dirección de Prevención de Crisis y de Recuperación. 2004. 146p. (disponible en www.undp.org/bcpr).

Reuters Foundation. 2006. Floods in southeast Asia force thousands to flee. 23 Dec 2006 08:30:00 GMT AlertNet. http://www.alertnet.org/thenews/newsdesk/SP142366.htm

Sánchez, et. al., 2006. Estudio de Monitoreo de Cobertura Forestal de Costa Rica 2005. I. Parte: Clasificación de la Cobertura Forestal con Imágenes Landsat ETM+ 2005. Proyecto ECOMERCADOS, Fondos Gef – Ecomercados. Convenio De Donación Tf 023681. 37p.

Sarewitz, Daniel; Pielke Jr. Roger and Keykhah, Mojdeh. 2003. Vulnerability and Risk: Some Thoughts from a Political and Policy Perspective Risk Analysis 23 (4), 805–810.

Steenhuis T S, et. al. Overland Flow Generation. *In*. Encyclopedia of Soils in the Environment. 2004, Elsevier.pp1-4.

Solano, J.; Retana, J. y Villalobos, R. 2002. Inundaciones. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. 9(2):104-122.

The Seattle Times. 2005. Proving global warming. A world of evidence says global warming is real. Sunday, October 9, 2005: Page updated at 12:00 a.m. http://seattletimes.nwsource.com/news/nation-world/globalwarming/1.html

United Nations. The Millennium Development Goals Report 2007. NewYork, 2007. 26p. http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Resources/Static/Products/Progress2007/UNSD_MDG_Report_2007e.pdf)

UN FAO and CIFOR.2005. Forests and floods: Drowning in fiction or thriving on facts? RAP Publication 2005/03; Forest Perspectives 2 Food & Agriculture Organization of the United Nations and the Center for International Forestry Research, Bangkok. 30p.

Wardlaw, R. B. ; Hulme, M; and Stuck Y.1996. Modelling the Impacts of Climatic Change on Water Resources Water and Environment Journal 10 (5), 355–364.

Wettstein, J.J. and Mearns, L.O. 2002. The influence of the North Atlantic-Arctic Oscillation on mean, variance and extremes of temperature in the northeastern United States and Canada, J. of Climate 15:3586–3600.

Wilk, J.; Andersson, L. and Plermkamon, V. 2001. Hydrological impacts of forest conversion to agriculture in a large river basin in northeast Thailand. Hydrological Processes. VL: 15: 14:2729-2748.

Williams, Michael R. and Melack, John M.1997. Solute export from forested and partially deforested chatchments in the central Amazon, Biogeochemistry, Volume 38 (1): 67-102. Williams, Melack, 1997

Williams, Michael R.; et. al. 1997. Solute dynamics in soil water and groundwater in a central Amazon catchment undergoing deforestation. Biogeochemistry, Volume 38 (3):303 – 335.

Xu, J.et. al. (Eds).2006. Managing Flash Floods and Sustainable Development in the Himalayas. Report of in International Workshop held in Lhasa, PRC, October 23-28, 20005. The International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD). 2006. http://books.icimod.org/index.php/downloads/publication/22

Yunling, He and Yiping, Zhang. 2005. Climate Change from 1960 to 2000 in the Lancang River Valley, China. Mountain Research and Development Vol 25 No 4 Nov 2005: 341–348.

Zárate, H. Eladio, 1977. Principales sistemas de vientos que afectan a Costa Rica y sus relaciones con la precipitación. Tesis de grado. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica.

Aplicación de ENOS como indicador de cambios en la precipitación máxima diaria en la cuenca del río Pejibaye y su impacto en inundaciones[2]

Jorge Fallas Gamboa (jfallas56@gmail.com), Investigador Proyecto EPIC-FORCE-UNA y Carmen Valverde Morales, Investigadora Proyecto EPIC-FORCE y profesora Escuela de Ciencias Ambientales, UNA (ginette.valverde@gmail.com).

Eje temático: Políticas públicas y gestión local; Simposio Cambio climático y eventos hidrometeorológicos extremos**.**

RESUMEN

En el presente trabajo se analizó la relación entre los episodios de ENOS y la precipitación anual y máxima en 24hr de la estación Bolivia (No.98011, 740 msnm), ubicada en la cuenca del río Pejibaye, Pacífico Sur, Costa Rica. El período analizado corresponde a 1969-2005. La distribución de Valor Extremo Generalizado (GEV) fue utilizada estimar periodos de retorno entre 1 y 200 años. La precipitación media anual durante los años Niño fue de 1909±332 mm, mientras que durante los años Niña se incrementó a 2583±365 mm. Los años neutros registraron una media de 2231 ±470 mm. Las diferencias son estadísticamente significativas (Mann-Whitney, $P< 0.05$). La fase cálida de ENOS tiende a generar años con precipitaciones máximas en 24hr menores (Mediana 91.1mm) comparada con los años de la fase fría (mediana 122 mm) ó los neutros (mediana 108 mm); sin embargo las diferencias no son significativas (Kruskal-Wallis, $P>0.1$). El aumento en la precipitación anual durante La Niña no parece tener ningún impacto en el período de retorno de los eventos máximos diarios. La distribución de frecuencia por episodio de ENOS para periodos de retorno de 2, 5, 10 y 50 años indica que ni la fase fría ni la cálida ejercen una influencia significativa (Chi-cuadrado; $P>0.1$) en la frecuencia de las precipitaciones máximas en 24 horas. En general, los años Niño tienden a generar eventos con períodos de retorno iguales o inferiores a 5 años (máximo de 141mm por día) en tanto que los años Niña y neutros se caracterizan por eventos con periodos de retorno entre 5 y 10 años (hasta 180 mm por día). La estación registró tres eventos extremos, el primero en 1988 con 253.4 mm (Niña), el segundo en 1993 (331.5mm, Depresión Tropical Gert, Neutro) y el tercero en 1996 (364.1 mm, huracán César, Neutro). Si estos eventos fueran ocasionados por condiciones climáticas normales, su periodo de retorno sería superior a los 150 años. La precipitación media máxima en 24 horas muestra una alta correlación con el Índice Oceánico de El Niño (ONI) de abril, julio, setiembre y octubre. El efecto de la Niña en las precipitaciones máximas en 24hr es más acentuado conforme las desviaciones de la temperatura en la zona del Niño 3.4 son mayores. Esto indica que si en el futuro tuviésemos episodios Niña muy severos se podría esperar un incremento en la magnitud de los eventos máximos en la cuenca del río Pejibaye, con lo que se acentuaría la severidad en las crecidas y las inundaciones.

---

[2] Ponencia presentada en el III Congreso Iberoamericano sobre Desarrollo y Ambiente, CISDA 2007. Dentro del **EJE TEMÁTICO**: Políticas Públicas y Gestión Local y el **Simposio**: Cambio Climático y Eventos Hidrometeorológicos Extremos.

ABSTRACT

On this paper we analyzed the effect of ENOS in annual and maximum 24hr precipitation for Bolivia station (No, No.98011, 740 msnm, South Pacific, Costa Rica) between 1969 and 2005. The Generalized Extreme Value distribution (GEV) was fitted to the data to estimate maximum 24hr rainfall events with return periods between 1 and 200 years. Annual average precipitation during Niño years was 1909±332 mm, whereas during Niña years was 2583±365 mm; and for neutral years was 2231 ±470 mm ((Mann-Whitney, P< 0.05). The warm phase of ENOS tends to generate years with lower maximum precipitation in 24hr (Medium 91.1mm) compared to Niña or neutral years (medium 122 mm and 108 mm, respectively); nevertheless the differences were not significant (Kruskal-Wallis, P> 0.1). The increase in annual precipitation during La Nina does not seem to have any impact in return periods of daily maximum rainfall. The frequency by episode of ENOS for return periods of 2, 5, 10 and 50 years indicates that neither the cold nor the warm phase exert a significant influence in the maximum precipitations in 24 hours (Chi-square; P> 0.1). In general, Niño years tend to generate events with return periods of 5 or less years (maximum 141mm per day) whereas neutral and Niña years are characterized by events with return periods between 5 and 10 years (up to 180 mm per day). The station registered three extreme events, one in 1988, hurricane Juana with 253,4 mm (Niña), another in 1993 (331.5 mm, Tropical Depression Gert, Neutral) and the third one in 1996 (364,1 mm, hurricane Caesar, Neutral). If these events were caused by normal climatic conditions, its return period would have been more than 150 years. The average precipitation Maxima in 24 hours shows a high correlation with the Oceanic Niño Index (ONI) of region 3.4 for April, July, September and October. The effect of La Niña in maximum precipitations in 24hr is accentuated, as the deviations of the temperature Niño zone 3.4 gets greater. If we were to have more severe Niña years we could expect larger 24 hr maximum events in the Pejibaye river basin and a possible increased in either the frequency o severity of floods. On the other hand, if the future were more like Niño years, we could expect a reduction in 24hr maximum precipitation and a possible reduction in maximum discharge and floods.

Introducción

Los eventos hidroclimáticos extremos (Ej. precipitaciones intensas y prolongadas, sequías y avenidas extraordinarias) y el ENOS son parte del comportamiento natural del clima; sin embargo en las últimas tres décadas han recibido gran atención por parte de la población, la prensa y los gobiernos por los efectos devastadores que ocasiona en el paisaje, los ecosistemas, las personas, sus bienes, la infraestructura y en la economía local y nacional (Costa Rica. sf.; Clarke and Rendell, 2006; Enquist, 2002; Karl and Easterling,1999; Guha-Sapir, Hargitt and Hoyois, 2004; Instituto Meteorológico Nacional, 2005; Khanal, Quesada y Arlet, 2007; Retana y Villalobos, 2003; Shrestha, and Ghimire, 2007; Xu, et.al., 2006; Wardlaw, Hulme, and Stuck, 1996.). Un evento climático extremo es aquel que tiene una baja frecuencia de ocurrencia en el tiempo en una localidad particular y por tanto entre uno y otro evento existen muchos años; sin embargo cuando ocurre causa un impacto severo en la naturaleza y/o en los bienes y servicios utilizados por los humanos (IPCC, 2001).

Las lluvias extremas y las avenidas que las acompañan forman parte de los procesos naturales de la cuenca; sin embargo en los últimos años han recibido mayor atención por parte de la academia (Jiménez, 2006; Landsea,1993; Landsea, and Gray, 1992; Landsea, et. al. 1996; Pérez, Carlos A., et. al. sf.; Programa Estado de la Nación, 2004; Sanker, and Nakano, 2006), los medios de comunicación (locales, regionales y mundiales) (Agencia EFE, 2001; ACAN-EFE y Redacción, 2003; ACAN-EFE, 2000,2001, 2002; Agencia EFE, Río de Janeiro, 2000) y los políticos (Jiménez, 2005¸ Valverde, 2001) debido a los impactos devastadores que han ocasionado en la población y las economías nacionales (Costa Rica. sf.; Chicago Tribune Web Edition, 2007; Quesada y Arley. 2007). Con frecuencia, la prensa, los grupos ambientalistas y los políticos asocian dichos eventos con la deforestación (legal e ilegal), la explotación de bosques (Kaimowitz, 2005; Osnos, Evan. 2006; Reuters Foundation, 2006) y el cambio climático (Doughton, 2005; Geenpeace, 2007; The Seattle Times, 2005; Yunling, and Yiping, 2005) y en muy pocas veces se reconoce el papel que juega la falta de planificación urbana y la invasión de las riberas y planicies de inundación (Instituto Meteorológico Nacional, 2005; Solano, Retana y Villalobos, 2002). Sin embargo a pesar del interés generalizado en el tema, existe poca evidencia científica sobre el impacto del calentamiento global y el cambio climático en la magnitud y frecuencia de los eventos climáticos extremos.

Las crecidas extraordinarias (aumento inusual en el nivel de agua en el cauce) forman parte del comportamiento natural del sistema hidrográfico de la cuenca, son el resultado de la combinación de condiciones de alta humedad en el suelo, lluvias abundantes y de larga duración asociadas a fenómenos climáticos tales como frentes fríos, depresiones tropicales y en especial huracanes. Dichos eventos en presencia de personas, bienes o infraestructura vulnerable se convierten en un desastre, el cual a su vez ocasiona una emergencia que se traduce en pérdida de vidas, bienes e infraestructura (Adamson, 2003; Chicago Tribune Web Edition, 2007; Easterling et al. 2000; Fonseca, 2007). Los impactos sociales y económicos de los eventos climáticos extremos afectan con mayor severidad a los grupos sociales más pobres del planeta y por tanto constituyen un obstáculo al desarrollo humano y una amenaza para el cumplimiento de los objetivos de Desarrollo del Milenio (Costa Rica. sf.; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2004; United Nations, 2007).

En los últimos 30 años los eventos extremos han provocado pérdidas económicas anuales crecientes. Por ejemplo, cifras del PNUD indican que en los años 60 las pérdidas económicas se

estimaron en US$75.500 millones; en los años 70 el montó ascendió a US$138.400 millones; en los 80s pasó a US$213.900, y finalmente en los 90 creció hasta alcanzar la suma de US$659.900 millones; la mayoría de estas cifras corresponden a países desarrollados (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2004). El número de eventos y de personas afectadas también ha aumentado en los últimos 30 años (Guha-Sapir, Hargitt and Hoyois, 2004).

El calentamiento global, su impacto en el cambio climático (incluida la variabilidad climática) y el posible efecto (incremento/reducción) en la frecuencia y/o magnitud de los extremos hidroclimáticos ha sido abordado por diversas investigaciones y publicaciones tanto en los medios de comunicación de masas como científicas a nivel mundial (Adame y Estrada, 2003; Biondi, and Cayan, 2001; Cáceres, Mejía y Ontaneda, s.f ; Brown and Katz;1995; EFE, 2001; Fu and Johanson, 2005; Fueglistaler and Fu, 2006; Haylock, et. al., 2006; La Nación, 2007; Mccarthy, 2007; Pachauri, 2002; Pounds and Puschendorf, 2004; Santer et. al., 2005). Sin embargo para Centroamérica y Costa Rica las investigaciones son escasas (Aguilar, et. al., 2005; Solano, Retana, y Villalobos, 2002, Solera, 2000). La investigación realizada hasta la fecha a nivel mundial indica que el comportamiento temporal y espacial de los eventos climáticos extremos es variable y que no es posible hacer afirmaciones o generalizaciones para regiones sin datos y menos aun sobre su tendencia en el futuro cercano (Brown, and Katz, 1995; Campos, s.f; Cavazos y Rivas, 2004; Clarke and Rendell, 2006; Ekström, et. al., 2005; Fonseca, 2007; Fowler, et. al., 2005; Fowler and Kilsby, 2003; Haylock, et. al., 2006; Karl and Easterling,1999; Gilleland and Katz, 2006; Pauling, and Paeth, 2007; Wettstein and Mearns, 2002).

La investigación citada en los párrafos anteriores permite afirmar que existe una tendencia hacia el aumento en la temperatura a nivel mundial y que de igual manera en la mayoría de los estudios realizados extremos en temperatura y precipitación se reporta una tendencia positiva en las temperaturas máximas; así como una reducción en los indicadores de temperaturas mínimas. Este calentamiento paulatino del planeta podría ocasionar otros efectos en la circulación atmosférica, oceánica y en los patrones de lluvia. Una de las preocupaciones de la comunidad científica y de los políticos es el posible incremento en la frecuencia y/o magnitud de las lluvias extremas; las cuales en presencia de poblaciones vulnerables podrían generar avenidas cada vez más severas y catastróficas (Emanuel, 2005; Frich, et.al. 2002; Greenpeace. 2007;Instituto Meteorológico Nacional,200; Kiladis and Diaz. 1989; Landsea, 2005; Lott, and Ross, 2006; Mccarthy, 2007; Solano, Retana y Villalobos, 2002).

Los escenarios de cambio climático y documentos relacionados elaborados para Costa Rica (Instituto Meteorológico Nacional, 200; 2005; Miranda, Otoya y Gutiérrez, 2005) no abordan el tema de los extremos climáticos. Dada la incertidumbre de los resultados obtenidos hasta la fecha y el comportamiento localizado de los eventos extremos no es posible utilizar estimaciones globales para crear escenarios nacionales y/o locales. El presente trabajo pretende aportar al conocimiento del comportamiento de la lluvia máxima en 24 horas en Costa Rica a través del análisis de una serie de 36 años de la estación Bolivia (No.98011, 740 msnm), cuenca del río Pejibaye, Pacífico Sur y su posible relación con los episodios de ENOS (Niño; Niña; Neutro).

Materiales y Métodos

Costa Rica, con 51.100 Km^2, es el segundo país más pequeño de Centro América; limita al norte con Nicaragua, al sur con Panamá, al este con el Mar Caribe y al oeste con el Océano Pacífico. Su población para el año 2005 era de 4.3 millones de personas; de la cual más del 50% se ubica en el Gran Área Metropolitana. Geográficamente se localiza entre 08°00' y 11°15' N y 82°30' y 86°00 O. La latitud media se estima en 9.97º Norte y la longitud media en 84°19' Oeste.

Área de estudio: Cuenca del río Pejibaye

La estación Bolivia (No.98011, 740 msnm) se encuentra en la subvertiente Pacífico Sur de Costa Rica (Fig.1). El clima es típico del Pacífica costarricense con una estación seca de diciembre a marzo (menos 60 mm/mes) y una estación lluviosa durante el resto del año (100 a 420 mm/mes). En el mes de julio se presenta un descenso en la precipitación conocida como el "veranillo". Los máximos mensuales de precitación se presentan en setiembre (348mm, CV:16%) y octubre (418 mm, CV:19%).

Figura 26: Ubicación de estación Bolivia. Costa Rica.

Análisis de datos

Patrón de lluvia anual y su relación con fases del ENOS

Para responder a la pregunta ¿Existe evidencia de cambios en la precipitación anual de la estación Bolivia en el periodo 1969-2005? se calculó la desviación (anomalía) anual con respecto a la media del periodo 1969-2005. Para verificar la consistencia de los datos se compararon los valores anuales con los de tres estaciones vecinas (San Martín, Cristo Rey y Agua Buena). Posteriormente cada año se clasificó como Niño ó Niña utilizando los datos y criterios de el Centro de Predicción Climática del Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos de América. Un año es declarado como Niña ó Niño cuando la desviación de la temperatura superficial del océano Pacífico (SST) de la Zona El Niño 3.4 supera ±0.5C durante 5 periodos sucesivos de tres meses (Climate Prediction Center, 2007). Finalmente se calcularon estadísticos descriptivos por episodio del ENOS y se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para probar por diferencias en las medianas de cada episodio. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa XLStats (Carr, 2007) utilizando un nivel de significancia de 5%.

Precipitación máxima en 24 horas y su relación con fases del ENOS

Para responder a la pregunta ¿Existe evidencia de cambio en la magnitud de los eventos máximos anuales de lluvia en 24hr en la estación Bolivia (No.98011, 740 msnm) en el periodo 1969-2005? se seleccionó la lluvia máxima anual diaria de cada año. Este valor corresponde a la precipitación medida entre las 7:00 am del día "n" y las 7:00 am del día "n+1. Cada evento máximo se clasificó por episodio de ENOS utilizando el mismo criterio del punto anterior. Se realizaron pruebas de correlación y regresión para analizar las posibles relaciones entre la magnitud de las lluvias máximas en 24hr y los índices IOS (Índice de Oscilar Sur) y ONI (Índice Oceánico El Niño 3.4); todas las pruebas se realizaron con un nivel de significancia de 5% ($P< 0.05$). Los registros históricos de IOS y ONI se obtuvieron de las bases de datos disponibles en la Oficina de Meteorología del gobierno de Australia (Australian Goverment Bureau of Meteorology, 2007) y NOAA (Climate Prediction Center, 2007).

Para determinar si existía algún cambio en la frecuencia de los periodos de recurrencia de los eventos máximos se ajustaron 5 distribuciones de frecuencia de valor extremo (Log Normal de 3 parámetros, Wakeby, Log Person tipo III, Valor Generalizado Extremo y no parámetrica) utilizando el programa CFA3 (Pilon and Harvy, 2001; Ponce,1989). El ajuste de distribuciones de frecuencia teóricas a datos extremos (Ej. máximos anuales en 24hr) permite estudiar su comportamiento y realizar estimaciones de periodos de retorno para eventos de diferentes magnitudes. El tiempo transcurrido entre dos eventos máximos sucesivos que exceden un valor determinado de lluvia es una variable aleatoria denominada periodo de retorno (Tr) o intervalo de recurrencia del evento. Se utilizó una criterio visual para seleccionar la distribución que mejor se ajustaba a los datos. Una vez seleccionada las distribución se calculó la lluvia máxima en 24hr esperada para eventos con una recurrencia de 2,5, 10, 100 y 200 años.

Resultados

1. Series anuales

La precipitación media anual de la estación Bolivia (No.98011), ubicada en la sección central de la cuenca del río Pejibaye, fue de 2262mm (± 491mm) para el periodo 1969-2005. El análisis de doble masa para la precipitación mensual indicó que no existe ningún cambio en el patrón de precipitación de la estación entre 1969 y 2005; tampoco existe una diferencia significativa entre la precipitación media anual para las décadas de los años 70s, 80s y 90s (Prueba de Kruskal-Wallis $P>0.1$). Sin embargo en la década del 80 se registró, en promedio, 167mm menos de lluvia que en la década del 90 y 225 mm menos que en la década del 70; situación que también ha sido detectada en otras localidades de Costa Rica (Retana y Villalobos, 2001) y que podría estar asociado a una reducción en la frecuencia de los ciclones tropicales en el mar Caribe (Alvarado y Alfaro, 2003). La variación también fue ligeramente menor en la década del 80 (18.8%, versus 23.8%-década 70 y 26.3%-década 90) (Fig. 2). El año más lluvioso fue 1973 con 3198 mm y el más seco 1992 con 1461 mm. De los 10 años más húmedos, 6 corresponden a años de la Niña, tres a neutros y 1 a El Niño.

La tendencia decadal de las precipitaciones máximas y mínimas sigue el patrón descrito para la precipitación media anual; con la diferencia de que la mínima para la década del 80 superó en 275mm a las otras dos décadas. El análisis de regresión localmente ponderada (LOWESS) con un factor de 0.3 identifica un patrón de descenso de la lluvia entre 1969-1988 (19 años), otro de ascenso entre 1989-1999 (10 años) y nuevamente un descenso entre 2000-2005 (5 años). El

análisis de intervalos de confianza utilizando 7 clases de cinco años cada una muestra un patrón similar (Fig. 3). Las desviaciones de la media (excluidos los datos de los años 1988 (Huracán Juana) 19993 (Depresión Tropical Gert) y 1996 (Huracán Cesar) muestran un patrón similar al descrito para LOWESS, con un patrón generalizado de descenso desde 1969 hasta 1993, un incremento entre 1994 y 2000 y nuevamente otro periodo de menor precipitación entre el 2000 y el 2005 (Figura 4). Se observó una relación positiva entre el índice SOI de junio y diciembre y la precipitación anual (Fig. 5).

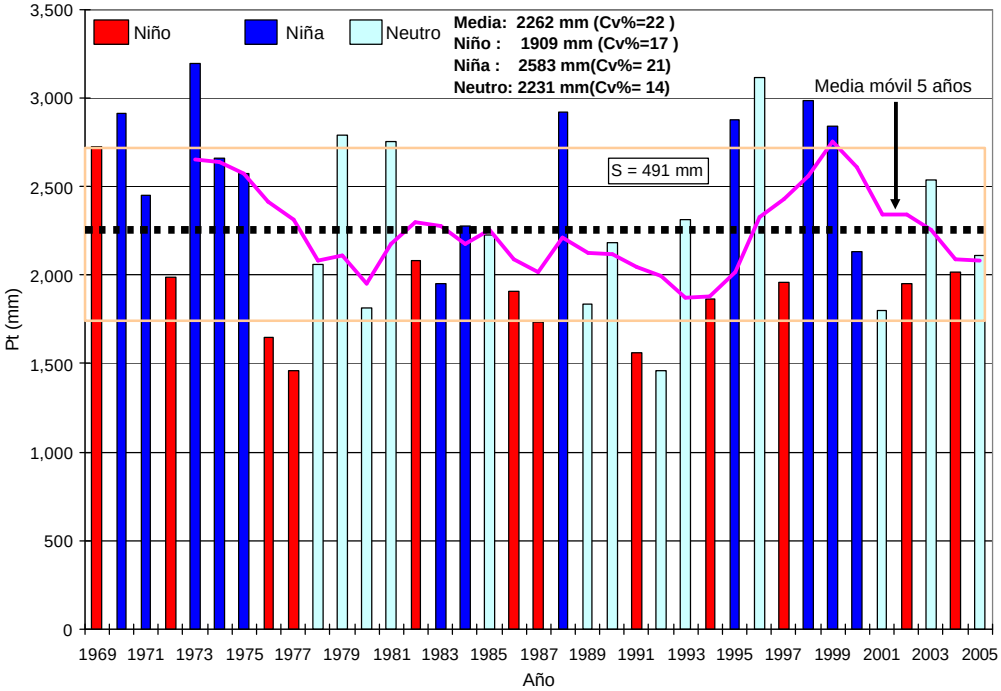


Figura 27: Comportamiento de la precipitación anual (mm) en la estación Bolivia (No.98011, 740msnm, 1969-2004), cuenca del río Pejibaye, Pacífico Sur, Costa Rica.

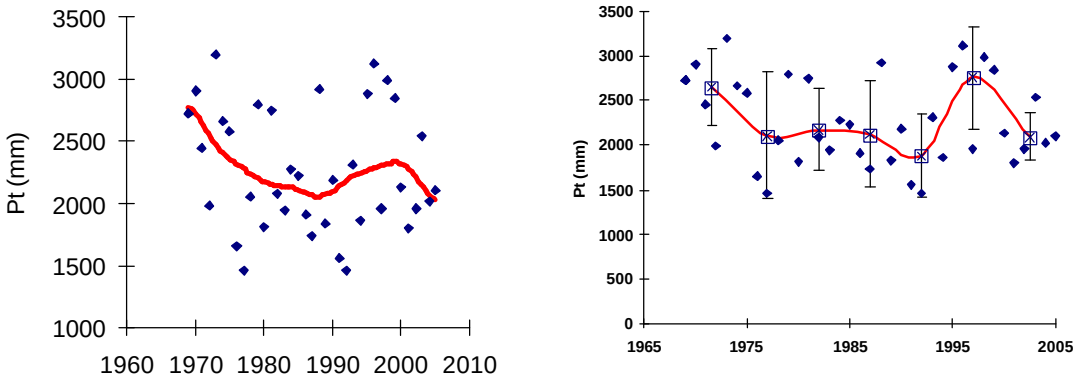


Figura 28: Tendencia en la serie según análisis de regresión localmente pondera (LOWESS) con un factor de 0.3 e intervalos de confianza del 95% para 7 grupos de cinco años cada uno.

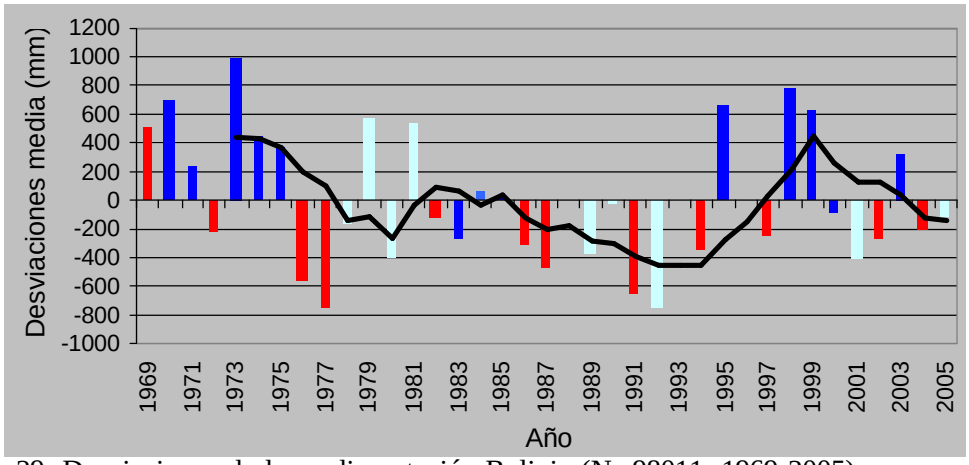


Figura 29: Desviaciones de la media, estación Bolivia (No.98011, 1969-2005), cuenca del río Pejibaye, Pacífico Sur, Costa Rica. El gráfico excluye los valores de 1988, 1993 y 1996.

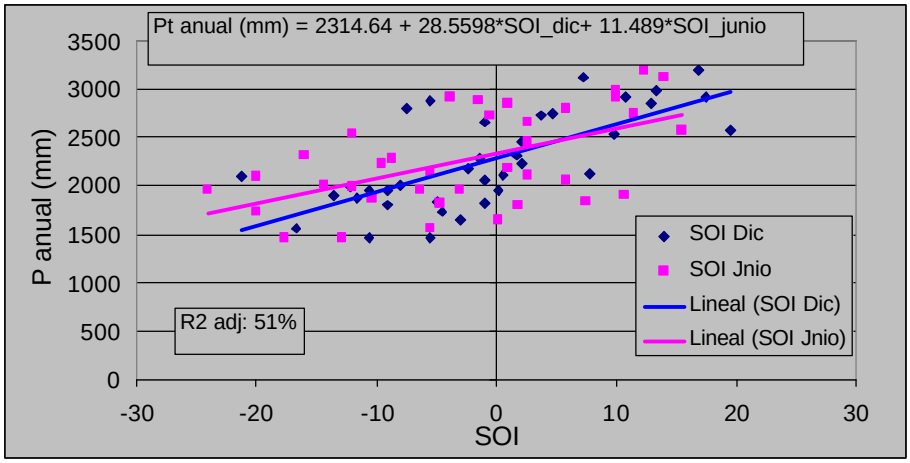


Figura 30: Relación entre el índice SOI y la precipitación anual de la estación Bolivia. R^2ajustado 51%. Error estándar de estimación: 343 mm. Valores positivos indican años Niña.

Los episodios de ENOS tienen una marcada influencia en la precipitación anual de la estación (Cuadro 1). Durante los años Niña la cuenca recibe una mayor cantidad de precipitación que durante los años Niño ó los Neutros (Mann-Whitney, $P<0.05$). De los 12 años Niño, el 92% presenta desviaciones negativas; lo cual representa un 58% de todas las desviaciones negativas del registro. Por otro lado, durante los anos Niña, el patrón se invierte ya que el 83% de los años corresponde a desviaciones positivas. Para los años neutros el 67% corresponde a desviaciones negativas (Cuadro 1).

Cuadro 1 : Desviaciones de media según episodio del ENOS. Estación Bolivia (No.98011), 1969-2005. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ICE. No incluye los valores de 1988, 1993 y 1996.

Episodio ENOS	Media±1S (mm)	Desviaciones (+)	Desviaciones (-)	Total
Niño	1909 (±332	1	11	12
Niña	2583 (±365)	9	2	11
Neutro	2231 (±470)	4	6	10
Registro	2262 (± 491)	15	21	33

2. Máximos en 24 horas

El 25% de los años registró eventos máximos en 24 horas superiores a 131 mm y el 10% superior a 173 mm (Cuadro 2). Los cuatro eventos máximos se midieron en 1973 (224.4mm, Niña), 1984 (177.5 mm, Niña), 1979 (176 mm, Neutro) y 1999 (170.9 mm, Niña (Fig. 6). Las lluvias ocasionadas por el efecto indirecto de los ciclones tropicales registraron valores aún mayores en 1996 (364 mm, Neutro, huracán César), 1993 (331.5 mm, Neutro, Depresión Tropical Gert) y 1988 (253.4 mm, Niña, huracán Juana). El 76% de los eventos máximos se presentaron en los meses de mayo (5) , agosto(5), setiembre (7) y octubre(11).

Cuadro 2: Estadísticos para la serie de precipitación máxima anual en 24 horas. Estación Bolivia (No.98011, 1969-2005). Fuente: basado en datos de ICE.

Estadístico		P. máxima anual en 24 horas (mm)**
Mediana		104.2
Min		69.8
Max		224.0
Percentil 10 (P10)		75.2
Percentil 25 (P25)		79.8
Percentil 50 (P50)		104.2
Percentil 75 (P75)		131.2
Percentil 90 (P90)		173.5
N		34
No. eventos >P90		No. ciclones tropicales
1970-1979	2	0
1980-1989	1	1 (Huracán Juana)
1990-2000	0	2 D. T. Gert y Huracán Cesar

*Se excluyeron los años 1988, 1993 y 1996 por considerarse que no forman parte de población de máximos en ausencia de ciclones tropicales.

La fase cálida del ENOS tiende a generar años con precipitaciones máximas en 24hr menores (Mediana 91mm) comparada con los años de la fase fría (mediana 125mm) ó los neutros (mediana 108mm); sin embargo las diferencias no son significativas (Kruskal-Wallis, P>0.1), (Fig. 7).

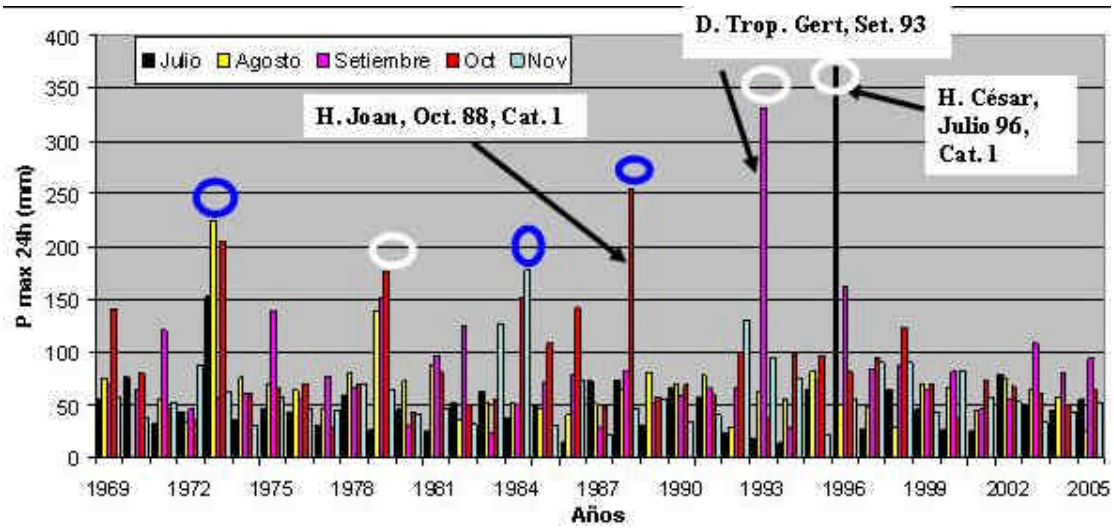


Figura 31: Precipitación máxima anual en 24 horas para los meses de julio, agosto, setiembre, octubre y noviembre. Bolivia (No.98011, 1969-2005). Los círculos azules indican años de La Niña y los blancos años neutros. Fuente: Basados en datos de ICE.

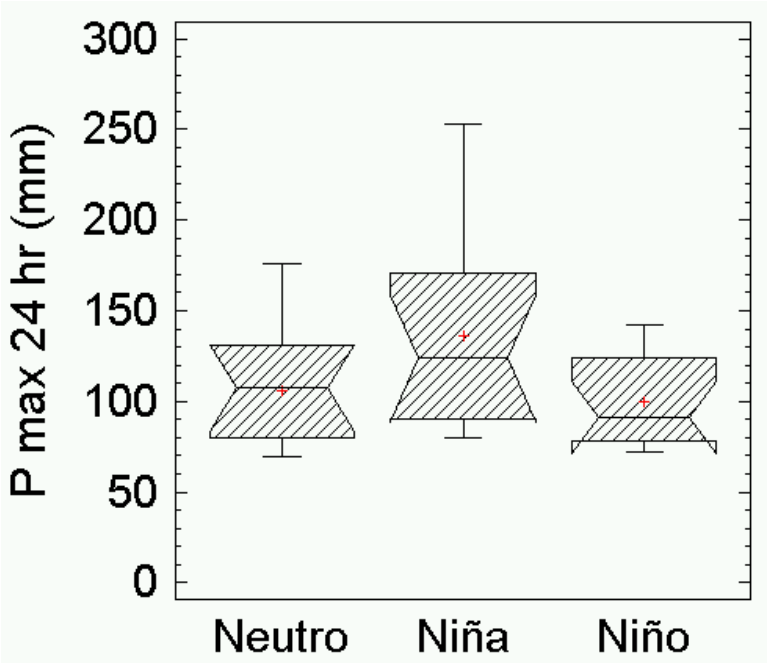


Figura 32: Precipitación máxima en 24hr y su relación con los episodios del ENOS. Bolivia (No.98011, 1969-2005). Se excluyeron los años 1993 y 1996 por considerarse valores extremos para la serie por el programa CFA3. Fuente: Basados en datos de ICE.

La precipitación máxima anual en 24 horas muestra una alta correlación con el Índice Oceánico de El Niño (ONI) de abril, julio, setiembre y octubre (Fig. 8). Dicha relación se expresa por el modelo Pmax24 hr = 117.412 + 44.9988*abril - 169.61*julio - 128.65*oct + 238.926*set (error estándar 29.1mm). El efecto de la Niña en las precipitaciones máximas es más acentuado conforme las desviaciones de la temperatura son mayores. Esto indica que futuros episodios de La Niña muy severos podrían incrementar la magnitud de los eventos máximos en 24 hr la cuenca de Pejibaye.

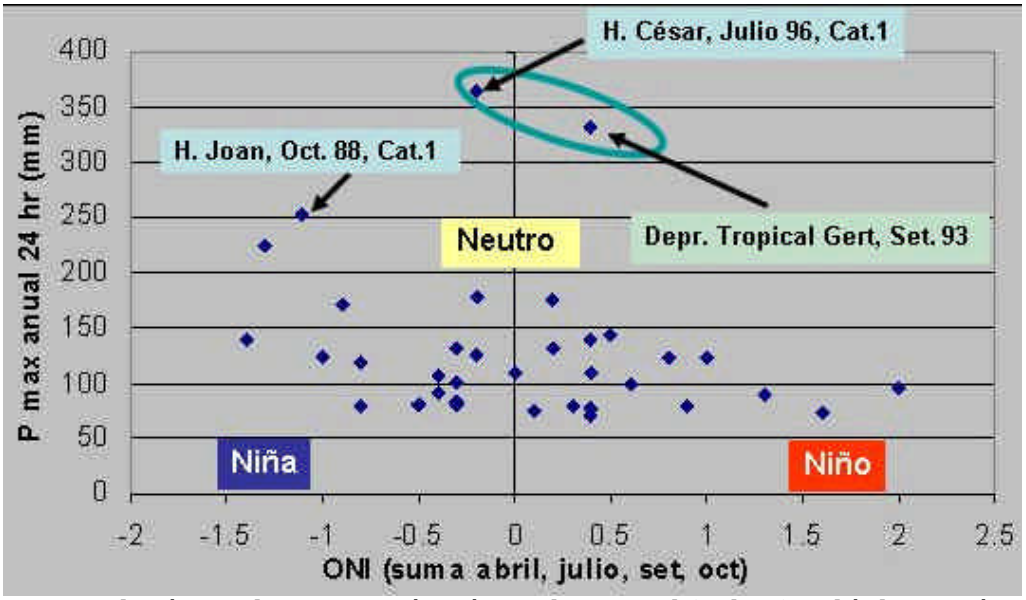


Figura 33: Relación ente la precipitación máxima diaria anual (Bolivia) y el índice Oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en Inglés). Valores positivos indica la fase cálida de ENOS (Niño) y los valores negativos la fase fría (Niña). Fuente: Basado en datos de ICE y Climate Prediction Center, 2007.

Periodos de retorno para eventos máximos de 24hr

El programa CFA3 (Pilon and Harvy, 2001) detectó como valores extremos para la serie a los datos de los años 1993 (331.5 mm, Depresión Tropical Gert) y 1996 (364.1 mm, Huracán César) y por tanto dichos valores no se utilizaron en el ajuste de las curvas. Una vez excluidos dichos datos, la serie cumple con los supuestos de independencia, aleatoriedad y homogeneidad.

Las distribuciones de frecuencia de Log Pearson tipo III (LP3) y Log Normal de 3 (LN3) Parámetros brindan estimaciones de precipitación muy similares para periodos de retorno entre 1 y 200 años; en tanto que las distribuciones de Wakeby y Valor Generalizado Extremo (VGE) también brindan estimaciones similares pero con valores menores que LP3 y LN3 para periodos de retorno superiores a 50 años (Fig.8). A partir del análisis visual del ajuste entre los datos medidos y la distribución teórica de frecuencia ajustadas (Fig. 9) se eligió la distribución de Valor Generalizado Extremo (VGE) para representar el comportamiento del set de datos.

El 94% de los años presentaron lluvias máximas en 24hr con periodos de retorno iguales o inferiores a 10 años. Según la distribución VGE se esperan precipitaciones del orden de 171 mm en 24 horas en promedio al menos una vez cada 10 años. Para un periodo de retorno de 50 años la lluvia esperada en 24 horas sería de 252 mm. Las lluvias registradas en 1993 (332 mm, Depresión Tropical Gert) y 1996 (364 mm, Huracán César) corresponden a un periodo de retorno superiores a 150 años. Para el periodo de registro (35 años) se esperaría tener entre tres y cuatro eventos iguales o superiores a 171mm; lo cual coincide con los 4 eventos observados; dos en la década de los 70s (1973-Niña; 1979-neutro), uno en la década del 80 (1984-Niña); y uno en la década 90 (1999, Niña). No se detectó ninguna cambio en la magnitud de los periodos de retorno para el periodo de estudio (Fig. 10). El evento con 57 años de periodo de retorno corresponde al huracán Juana (1988).

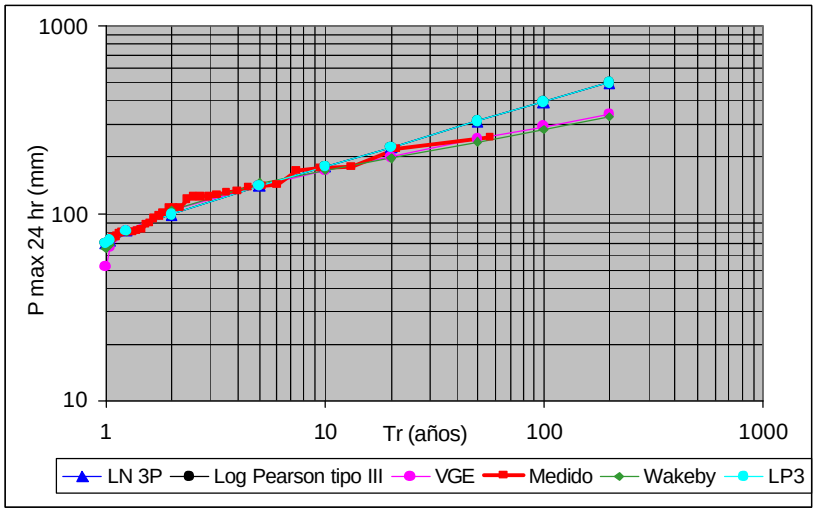


Figura 34: Distribuciones de frecuencia para datos de precipitación máxima anual en 24 horas. Se excluyeron los valores de 1993 (332 mm) y 1996 (364 mm) por detectarse como valores extremos para la serie. Bolivia (No.98011, 1969-2005).

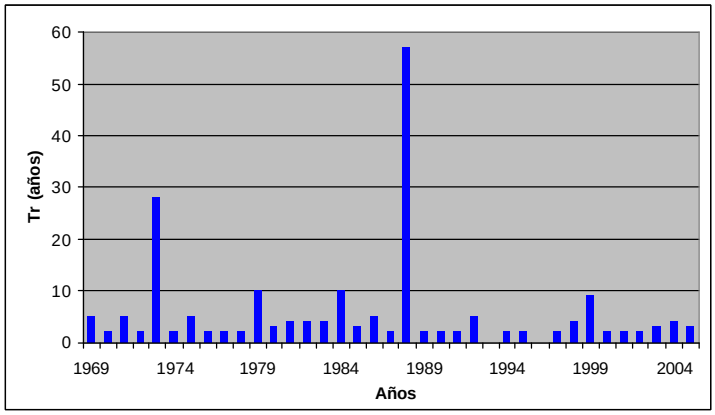


Figura 35: Periodo de retorno esperado para lluvia máxima anual en 24 horas para la estación Bolivia (No.98011, 1969-2005). Se excluyeron los valores de 1993 (332 mm) y 1996 (364 mm) por detectarse como valores extremos para la serie.

La distribución de frecuencia por episodios del ENOS para periodos de retorno de 2, 5, 10 y 50 años (Fig. 11) indica que ni la fase fría ni la cálida ejercen una influencia significativa (Chi-cuadrado; P>0.1) en la frecuencia de las precipitaciones máximas en 24 horas. En general, los años Niño tienden a generar eventos con períodos de retorno iguales o inferiores a 5 años (máximo de 141mm por día) en tanto que en los años Niña y neutros predominan los eventos con periodos de retorno entre 5 y 10 años (hasta 180 mm por día). Los dos eventos ocasionados por el efecto indirecto del huracán César (1996) y la depresión Tropical Gert (1993) se excluyeron del análisis por considerarse como valores extremos para la serie. El 53% de los eventos con periodos de retorno iguales o inferiores a 2 corresponden a años Niño; por el contrario el 43% de los eventos con periodos de retorno de 5 a 10 años corresponden a años Niña.

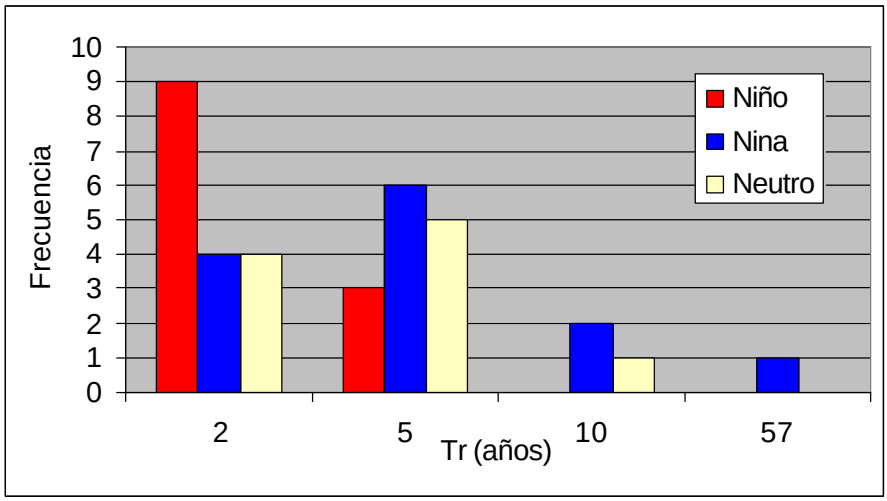


Figura 36: Número de eventos para períodos de retorno inferiores o iguales a 2, 5, 10 y 57 años por episodio de ENOS. Se excluyeron los valores de 1993 (332 mm) y 1996 (364 mm) por detectarse como valores extremos para la serie.

Discusión

Cambio climático y eventos extremos

Existe consenso en la comunidad científica de que en el último siglo y especialmente en los últimos 30 años la temperatura media de la superficie terrestre ha incrementado (Adger, et al. 2007; Alexander, et al. 2006; Alley, et al. 2007). Sin embargo también existen abundantes registros sustitutos ("proxy") que indican que el siglo XX no es posiblemente el más caliente o el único extremo climático en el último milenio; aunque se reconoce que la actividad humana ha contribuido a dicho calentamiento, el cual ha impactado severamente ambientes locales (Soon W, et. al. 2003). También se plantea la hipótesis de que a consecuencia de dicho calentamiento y las alteraciones ocasionadas en los sistemas oceánico-terrestre y atmosférico se podría esperar un incremento en la frecuencia y magnitud de los eventos climáticos extremos (Alexander, et al. 2006; Adame y Estrada, 2003; Aguilar, et. al, 2005; Frich, et. al., 2002; Instituto Meteorológico Nacional, 2005; Smith, Yin and Gruber, 2006; Peterson, et. al., 2003). Las predicciones de los modelos climáticos globales y la interpretación de sus interacciones, sinergias y teleconexiones en los procesos terrestres, atmosféricos y oceánicos ante un escenario

de aumento en los gases de efecto invernadero indican que las lluvias extremas se convertirán en más frecuentes y que las temperaturas mínimas serán menos frecuentes (Aguilar, et. al., 2005; Alfaro, 2007; Frich, et. al, 2002). Sin embargo los datos que sustentan estas hipótesis son escasos e inconclusos, especialmente en los trópicos (Aguilar,et.al, 2005; Tank, et. al.2006; Frich, et. al., 2002; Peterson, et. al., 2003).

En los últimos 7 años la comunidad científica ha definido una serie de indicadores derivados de registros de temperatura y precipitación que permiten documentar el cambio en los extremos climáticos (Aguilar, et. al, 2005; Nicholls and Murray, 1999; Nicholls and Alexander, 2007; Peterson, et. al.. 2003); sin embargo la evidencia a escala global, regional y local indica que existen extensas áreas que no cuentan con registros confiables de precipitación diaria (Frich, P. et.al., 2002). Esto limita severamente el estudio de los extremos climáticos, pues sin datos no es posible aceptar o rechazar que se están produciendo cambios en los extremos climáticos. Otra limitante de los análisis es que en el caso de precipitación, debido a su alta variabilidad estacional e interanual, es poco probable detectar tendencias en el tiempo cuando se utilizan registros de treinta o menos años y solo una estación (Frich, P. et.al., 2002).

En la mayoría de los estudios realizados fuera de los trópicos se han detectado cambios significativos en temperaturas máximas y mínimas, sin embargo los cambios en precipitación extrema han sido menos conclusivos y de naturaleza localizada y/o errática (Alexander, et al. 2006; Frich, et.al., 2002; Nandintsetseg, Greene, and Goulden, 2007; Tank and Klein, 2006). Por ejemplo, Frich et.al. (2002), analizando datos de 1946 a 1999, encontraron tendencias positivas significativas en la mayoría de los indicadores de eventos máximos de lluvia en el extremo sur de África, el sureste de Australia, Rusia occidental, partes de Europa y el este de los Estados Unidos de América. En contraste, en el este de Asia y Liberia (África) encontraron una reducción en la frecuencia y/o severidad de las lluvias máximas. El estudio no analizó datos de Centro y Sur América; ni de África. Resultados inconclusos fueron reportados por Tank et.al.(2006), analizando datos para 1961-2000 en el centro y sur de Asia y para el norte de Mongolia por Nandintsetseg, Greene, y Goulden (2007) para el periodo 1963-2002. En ambos casos no se detectó ninguna tendencia significativa en las lluvias máximas; aunque sí se observó en Mongolia (1963-2002) un ligero incremento en la cantidad de lluvia en 5 días. Peterson, et. al. (2003) encontraron que en el Caribe ha disminuido el número de días secos y aumentado el número de episodios lluviosos fuertes, mientras que el número de días y noches muy cálidos ha aumentado.

Existen pocos estudios sobre eventos climáticos extremos en Costa Rica. Retana y Villalobos (2001) analizaron el comportamiento de la precipitación anual extrema (exceso de precipitación anual del 18%, aproximadamente 253 mm) en la estación Linda Vista (latitud 09 50, longitud -83 58, 1400msnm, 1952-2003), Valle del Guarco, Cartago, Región Central Oriental. Aun cuando los episodios de La Niña tienden a generar años lluviosos, no se detectó una relación directa entre este episodio de ENOS y el exceso de precipitación anual; ya que dichos eventos pueden generarse aun en ausencia de las fases de ENOS (Ej. años neutros). Un año extremo lluvioso puede generar un exceso de lluvia de entre 18% (253 mm) y 55% (776 mm), distribuidos principalmente en los meses de agosto y diciembre. Del total de años lluviosos solo el 40% correspondió a años Niña, seguido de 33% en años Niño. Los datos de la Región Chorotega muestran que los años Niña pueden generar entre 300 y 400mm de lluvia adicional, distribuida principalmente entre agosto, setiembre y octubre (Retana y Solano, 2000).

El comportamiento de la precipitación anual en la estación Bolivia muestra un patrón similar al observado en otros estudios a nivel mundial. La lluvia presenta una alta variabilidad interanual (CV%: 22%), con periodos caracterizados por anomalías positivas y negativas. La década del 80 fue particularmente seca comparada con las décadas del 70 (+225mm) y 90 (+167mm); sin embargo no se observó ningún predominio de alguna de las fase de ENOS (50% Niñas en el 70, 30% Niñas en 80 y 30% Niñas en el 90 y 30% Niños en cada década). Una característica interesante en dicha década fue la reducción en la frecuencia de ciclones tropicales en el Mar Caribe (Alvarado y Alfaro, 2003). El ENOS explicó poco de la variabilidad interdecadal; resultados similares fueron reportados por Retana y Villalobos (2001) para el estudio de años lluviosos en la estación Linda Vista, Cartago. Sin embargo al utilizar el registro como un todo (36 años) sí se detectó un efecto significativo de las fases de ENOS en la precipitación anual. Al igual que otras latitudes la fase fría de ENOS en la estación Bolivia está asociada a un aumento medio en la precipitación anual (hasta 674mm) comparado con los años Niño, lo que representa un 35% de la lluvia media que se recibe en los años Niño. La relación entre el Índice de Oscilación del Sur (IOS), el cual mide las fluctuaciones de la diferencia de presión entre la ciudad de Darwin (Australia, Pacífico Occidental) y la isla Tahití (Pacífico Central) indican que un incremento en su valor tiende a generar en la estación Bolivia años con abundante precipitación y viceversa. Si a consecuencia del cambio climático se previera un aumento en las diferencias de presión (más discrepancias positivas, Niñas) se esperaría un incremento en el número de años lluviosos y muy lluviosos en la cuenca de Pejibaye. Por otro lado, si se intensifica la fase cálida de ENOS se esperarían mas años seco y muy secos. En la cuenca baja del río Tempisque (Región Chorotega), se ha observado una mayor proporción de años lluvioso durante el periodo 1970 a 1998-200; con una tendencia a centrarse el exceso de lluvia en los meses de agosto, setiembre y octubre; periodo que también está asociado a una mayor frecuencia de inundaciones (Retana y Solano, 2000).

Ciclones tropicales

El Ciclón Tropical (CT) es un término genérico utilizado para designar el flujo circular de masas de aire húmedo y caliente de gran escala que se forma en los trópicos y subtrópicos caracterizados por vientos muy fuertes en los niveles bajos de la atmósfera; estos incluyen las tormentas tropicales (ciclones con una velocidad máxima sostenida entre 18 y 32 ms^{-1}), los huracanes (ciclones con una velocidad máxima sostenida superior a 33 ms^{-1}) y oros vórtices rotatorios más débiles.

Aun cuando los ciclones tropicales afectan las condiciones climáticas regionales y locales, ocasionando lluvias extremas y avenidas extraordinarias en extensas áreas del planeta, no es posible afirmar que todas las lluvias extremas están asociadas a dicho fenómeno y menos aún hacer predicciones locales a partir de datos globales (Emmanuel, 2005; Klotzbach, 2006; Levinson, et. al, 2006; Pielke, et. al, 2005). Alfaro (2007) analizando la actividad de ciclones tropicales para el periodo 1944-2004 (61 años) indica que los años con pocos huracanes estaban asociados a condiciones típicas de El Niño, caracterizadas por temperaturas más frías en el Atlántico Tropical Norte y más cálidas en el Pacífico Central y Oriental y con una mayor cortante vertical del viento en el Atlántico Tropical Norte pero menor en el Pacífico Ecuatorial del Este cerca de Centroamérica y a una presión media a nivel del mar mayor en el Atlántico Tropical Norte y menor en el Pacífico Ecuatorial del Este. Años con una alta actividad de huracanes mostraron, en términos generales, una alta correlación con las condiciones

atmosféricas típicas de La Niña. Por ejemplo, en los Estados Unidos de América, el daño más severo ocasionado por los huracanes también está asociado a la fase fría del ENOS (Niña) (Pielke and Landsea, 1999).

En general, los episodios Niño (fase cálida de ENOS) se desarrollan y/o se intensifican cuando en la estratosfera tropical se presenta la fase este de la Oscilación CuasiBienal (OCB) (Baldwin, et al., 2001); en tanto que La Niña (fase fría de ENOS) tiende a desarrollarse o a intensificarse durante la fase oeste de la OCB. Durante la fase este de OCB, los procesos de convección tienden a intensificarse a lo largo del Ecuador y a reducirse en las altas latitudes (10-20 grados); lo que conduce al desarrollo de mas frecuentes y fuertes Oscilaciones Madden-Julian, patrón de desplazamiento anómalo de la precipitación ecuatorial de escala planetaria con ciclos entre 30 y 80 días que se observa principalmente en el Océano Indico y Pacífico; esto a su vez dispara las ondas oceánicas Kelvin, las cuales pueden iniciar, mantener ó intensificar El Niño cuando existe suficiente calor almacenado en el Pacífico Occidental. Sin embargo la relación no es perfecta ni univoca como lo demostró El Niño de 1997 (Gray, et. al. 1999).

Con frecuencia, en Costa Rica, se asocia a los huracanes y otros ciclones tropicales con abundante precipitación y un periodo prolongado de lluvias ("temporales"); sin embargo el país no está en la ruta directa de los huracanes. La probabilidad de que Costa Rica sea impactada directamente por un ciclón tropical es inferior al 5% (Alvarado,2003). En el caso de los datos de la estación Bolivia (1969-2005), los tres eventos máximos en 24 horas están asociados a ciclones tropicales (huracán Juana en 1988 con 254mm, huracán César en 1996 con 364 mm y la depresión Tropical Gert en 1998 con 332 mm). El huracán Gilbert (10-16 setiembre 1988) se considera como el más intenso del siglo XX (categoría 5); sin embargo no ocasionó tanto daño en Costa Rica como el Juana (18-24 octubre, 1988, categoría 4-5). El cuadro 3 lista los huracanes más intensos que cruzaron el Mar Caribe produciendo temporales en Costa Rica y las precipitaciones en 24hr registradas en la estación Bolivia.

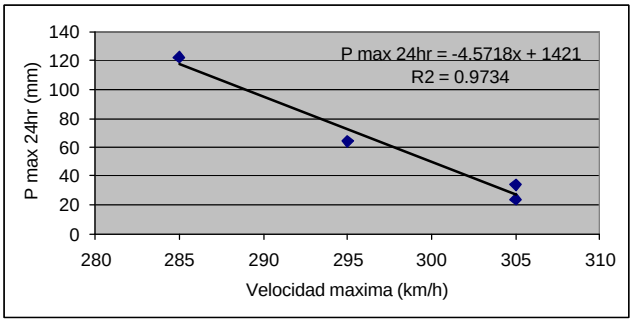
Cuadro 3: Ciclones tropicales más intensos (basados en presión y velocidad del viento estimado en superficie que afectaron indirectamente a Costa Rica en el siglo XX y su efecto en la precipitación máxima en 24hr en la estación Bolivia.

Huracán	Precipitación máxima en 24hr en la estación Bolivia (mm)		ENOS
	Durante el ciclón	Anual	
Gilbert (10-16 setiembre, 1988)	63.7, 14 setiembre	123.7, 22 octubre	Niña
Allen (31 jul-11 ago, 1980)	23.6, 9 agosto	108.1, 26 mayo	Neutro
Camille (14-22 ago, 1969)	34.0, 21 agosto	140.4, 13 octubre	Niño
Mitch (27-29 oct, 1998)	122.4, 28 octubre	123.7, 22 octubre*	Niña

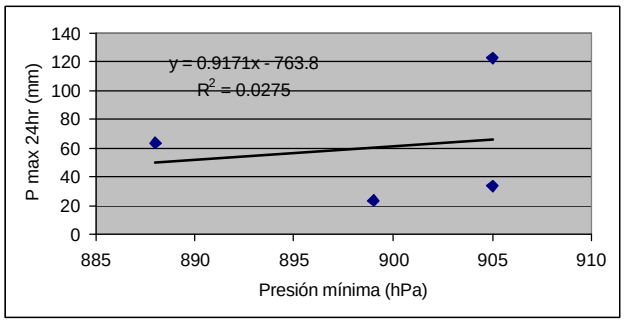
Fuente: adaptado de Alvarado,2003. *Excluida la lluvia asociada a ciclón tropical (1988)

La relación observada en la figura 12 parece confirmar la afirmación de Alvarado (2003) en el sentido de que la intensidad de los temporales en Costa Rica no está directamente asociada a

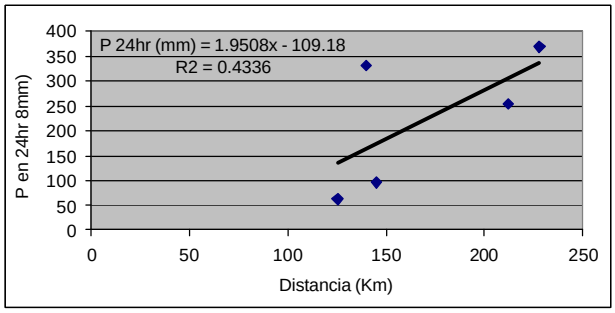
la magnitud del ciclón; sino que depende más bien de su posición con respecto a la costa Caribe y a su velocidad de desplazamiento sobre el mar Caribe. En el caso de la estación Bolivia la relación entre velocidad del ciclón y la precipitación máxima registrada es inversa; o sea a menor velocidad mayor precipitación. Esta relación puede ser fortuita y causada por los pocos eventos analizados. Por otro lado, la estación Bolivia se ubica a 13 Km al este de la costa Pacífica de Costa Rica y a 105 Km de la Costa Caribe. La cordillera de Talamanca con elevaciones de hasta 3800msnm separa a la costa Caribe de la Pacífica. Estas condiciones podrían atenuar el efecto del huracán y simular el comportamiento de la precipitación en la costa Pacífica bajo un sistema de baja presión en el occidente del Mar Caribe. Bajo estas condiciones se genera abundante lluvia en el Pacífico costarricense, ejemplos de estas condiciones son las lluvias ocasionadas por Katie (1955), Jenny (1969) y Delia (1973) antes de convertirse en tormenta tropical (Alvarado, 2003). La relación inversa entre la distancia de los ciclones y la precipitación en 24 horas registrada en Bolivia parece apoyar esta hipótesis (Fig. 12).



A



B



C.

Figura 37: Relación entre velocidad máxima (Km/h) (A), presión mínima (hPa) (B) y distancia a la costa Caribe (C) de los ciclones y su relación con la precipitación en 24 hr (mm) registrada durante el ciclón en la estación Bolivia.

Las tormentas tropicales requieren que la temperatura del océano sea igual o superior a 26 °C para mantenerse y continuar su evolución hacia la formación de huracanes. El aumento en la temperatura superficial del océano y en el contenido de vapor de agua en la capa baja de la troposfera favorecen la formación de ciclones tropicales más intensos y/o de mayor duración (Emanuel, 2005; Kerr, 2006; Klotzbach, 2006; Trenberth, 2005; Webster, et al., 2005). El año 2005 con 28 tormentas en el Atlántico marcó un nuevo record, el cual correspondía al año 1933 con 21 tormentas. Aun cuando no existe duda en la comunidad científica sobre el impacto de mayor temperatura y humedad en los huracanes, sí existe discrepancia sobre la explicación del incremento en la frecuencia/intensidad de los ciclones tropicales. Por un lado algunos científicos lo atribuyen al calentamiento global (Ej. Emmanuel, 2005; Kerr, 2006; Klotzbach, and Gray, 2006; Trenberth, 2005; Webste et. al., 2005) y otros a la variabilidad natural asociada a los ciclones tropicales (Ej. Landsea, 2005;Landsea, et.al, 2006; Pielke, et. al, 2005), independientemente del calentamiento global. Otro argumento que se esgrime es la falta de registros confiables en cuanto a la clasificación de la severidad de los ciclones tropicales en las décadas del 60 y 70 (Diamond, 2006). Por ejemplo, el reanálisis de los datos de ciclones tropicales en el Océano Indico para dicho periodo dan como resultado valores de severidad similares a los observados actualmente (Landsea, et. al., 2006).

Los datos de temperatura media de la superficie terrestre para el 2005 indican que fue el más caliente desde 1880, con una anomalía global de 0.53 °C con respecto a la media de 1961-90 y en ausencia de un Niño fuerte; sin embargo estadísticamente dicho valor no puede distinguirse de la anomalía del año 1998 (0.50 °C) ó de los valores de los últimos 4 años (2001-2004) (Shein, ed., 2006). Por otra lado, la temporada 2006 de huracanes del Atlántico finalizó con una actividad ligeramente inferior a la esperada para la media del periodo 1950-2000. El cuadro 4, tomada de Klotzbach y Gray (2006) ilustran la dificultad de realizar afirmaciones basadas en el comportamiento de eventos particulares. Según estos autores el incremento inusual observado en el número de huracanes en la temporada 2004 y 2005 se encuentra entre la variabilidad natural esperada y no puede atribuirse al calentamiento global; sin embargo según Klotzbach (2006), la cuenca del Atlántico es la única que ha mostrado un incremento en número e intensidad de los huracanes en años recientes, como lo demuestra el cuadro 4.

Cuadro 4: Actividad ciclónica en la cuenca del Atlántico* durante el año 2006, media del periodo 2004-2005; actividad durante 1995-2003 y media climatológica de 1950-2000. Los valores en paréntesis indican la relación entre el número de huracanes del 2006 y la de los otros periodos.

Parámetro	2006	2004-2005	1995-2003	1950-2000
Tormentas con Nombre	9	20.5 (44%)	13.6 (66%)	9.6 (94%)
No. días que duró la tormenta	50	109.4 (46%)	73.3 (68%)	49.1 (102%)
Huracanes	5	12.0 (42%)	7.7 (65%)	5.9 (85%)
No. huracán-días	20	47.6 (42%)	34.2 (58%)	24.5 (82%)
Huracanes intensos	2	6.5 (31%)	3.6 (56%)	2.3 (87%)
Días de huracanes intensos	3	20.0 (15%)	8.8 (34%)	5.0 (60%)
Actividad Neta de los Ciclones Tropicales	85	252.8 (34%)	148.5 (57%)	100 (85%)

* La cuenca del Atlántico incluye el Océano Atlántico Norte, el Mar Caribe y el Golfo de México.

ENOS y eventos extremos

En términos generales, se asocia a la fase cálida del ENOS (Niño) con una reducción en la precipitación anual en la vertiente Pacífica y Central de Costa Rica y un aumento en la vertiente Caribe. Retana y Villalobos (2000) analizando el comportamiento anual de la precipitación en 37 estaciones meteorológicas ubicadas en todas las regiones climáticas de Costa Rica encontraron que efectivamente existe entre un 50 y 80% de probabilidad de que años Niño correspondan a años secos en dicho sector del país, con una reducción media de lluvia anual del 26%. Por otro lado, la vertiente Caribe tiene entre 30 y 70% de probabilidad de que un año Niño sea lluvioso, con un incremento de hasta 650mm anual. El comportamiento de la precipitación anual no tiene una buena relación con El Niño en la Región Central Oriental (Cartago) ni en la Zona Norte.

Haylock, et. al. (2006) reportaron cambios significativos en el patrón de lluvia anual y extrema para América del Sur en el periodo 1960-2000. Sus resultados indican que entre 1960 y 2000 se observó un cambio hacia condiciones más húmedas en Ecuador, el norte de Perú y la región sur de Brazil, Paraguay y Uruguay y norte y centro de Argentina. Por otro lado, también se observó una tendencia a la disminución de lluvia en el sur de Perú y el sur de Chile. Los cambios observados están asociados a un incremento en el valor de las anomalías negativos en el Índice de Oscilación Sur (SOI) (Niña). Los autores concluyen que los cambios observados en precipitación (aumento y reducción) pude explicarse por cambios en ENOS; los cuales desplazan hacia el sur la ruta de las tormentas.

El estado del clima del año 2005 reporta que la precipitación media mundial fue muy cercana a lo norma del periodo 1961-90, con una anomalía mundial de tan solo -0.87mm. De 1980 al 2005, solo 7 años han mostrado una precipitación sobre la normal; para el año 2005 solo setiembre, octubre y noviembre presentación una anomalía positiva (Shein, 2006).

En el Pacífico costarricense, durante años Niño la reducción en precipitación anual va desde 17% (235mm) hasta 33% (470mm) y se observa entre julio y noviembre; por el contrario en el Pacífico Norte se espera un incremento de 300 a 400mm de lluvia anual durante años Niña (Retana y Solano, 2000). Para el Valle Central, durante años Niña existe una probabilidad de 74% de que se presenten condiciones lluviosas. Los años lluviosos extremos tienen un período de recurrencia de 8 años y presentan un aumento de lluvia anual de 568 mm (26.1%) concentrados en el período lluvioso (mayo-noviembre). Estos años no generan necesariamente inundaciones naturales. Muchas de las inundaciones en áreas urbanas se pueden presentar bajo condiciones de lluvia normales. El problema es de carácter estructural y de ordenamiento urbanístico más que de naturaleza climática. A pesar de ello, a partir del 2002 se han registrado períodos mensuales de fuertes precipitaciones pero concentrados en pocos días de lluvia (Instituto Meteorológico Nacional, 2005).

Escenarios de cambio climático y su posible impacto en eventos extremos en Costa Rica

A partir del resultado de Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) el Programa Centroamericano de Cambio Climático (PCCC) estima que Costa Rica podría experimentar una variación máxima en la precipitación diaria de ±20% y una variación moderada de ±10%; en tanto que las variaciones en temperatura media se establecieron en +1°C y +2°C. El primer comunicado de Cambio Climático de Costa Rica (Instituto Meteorológico

Nacional, 2000) indica que los principales impactos esperados para el país basados en el escenario global IPCC (IS-92a) para el año 2100 serían:

- La región del Pacifico Norte experimentará, los mayores incrementos de temperatura con respecto a la media en los meses de mayo y junio (hasta +3,8 °C). La precipitación disminuirá con respecto al media actual en la estación seca (diciembre-abril), presentándose una reducción máxima en marzo (-63%). La nubosidad disminuye en los meses de julio y agosto (-20%), así como en el mes de febrero (-23%) y aumenta en el mes de marzo (+18%). La reducción en la precipitación en la estación seca estaría explicada por la reducción en el aporte de las brisas marinas durante dicha estación como consecuencia de un aumento en la velocidad del viento alisio, produciendo un aumento del derrame de la nubosidad en marzo y abril.
- En el Caribe Norte y la mayor parte de la vertiente Norte, los mayores incrementos de temperatura (+3,2°C) se presentan en los meses de mayo a junio y en diciembre y enero. La precipitación disminuye en la época más seca del año (abril), hasta en un -49%. La cobertura nubosa disminuye en los meses de noviembre y diciembre (-26%), así como en julio (-21%) y aumenta en marzo y abril (+14%).
- En el Pacífico Central, Sur y Caribe Sur, los mayores incrementos de temperatura (hasta +3,5°C) se presentan en el mes de mayo. La precipitación disminuye en los primeros meses del año alcanzando un máximo en marzo (-46%). La cobertura nubosa presenta su mayor disminución en los meses de setiembre a diciembre.
- En la sección sur de la Península de Nicoya los mayores incrementos de temperatura se darán en los meses de mayo y junio y en diciembre y enero, alcanzando los 3,2°C. La precipitación disminuirá en la época más seca del año (abril) hasta en un –49%.

Los pronósticos para el Pacífico de Costa Rica muestran una reducción de entre 46 y 63% de la precipitación durante la estación seca (diciembre-abril), a primera vista este valor parece importante; sin embargo si observamos la distribución porcentual histórica de la precipitación en dichos meses (Fig.13) notamos que en la mayoría de los casos dicho periodo aporta menos del 10 por ciento de la precipitación total anual en la mayor parte del Pacífico Norte, Central y Sur, excluida la Península de Osa y el valle de Coto Colorado. El escenario de cambio climático del año 2000 centra su atención en la reducción esperada de la precipitación a nivel nacional; sin embargo no hace mención a posibles aumentos en la misma y menos aún sobre cambios en los eventos climáticos extremos. Los resultados obtenidos en el presente estudio y los citados a lo largo del documento indican que ENOS juega un papel importante en el patrón espacial y temporal de la precipitación y que por tanto si el cambio climático recrudece las manifestaciones de la Niña ó más años neutros podrían ocasionarse incrementos en las lluvias máximas en 24 horas y con ello incrementar la probabilidad de avenidas e inundaciones; en tanto que una intensificación de El Niño ocasionaría el efecto inverso (Grove, 1998). El estudio de Haylock, et. al. (2006) ilustra que estos cambios son posibles y que ocasionan impactos más severos que los pronosticados por los modelos de simulación climática.

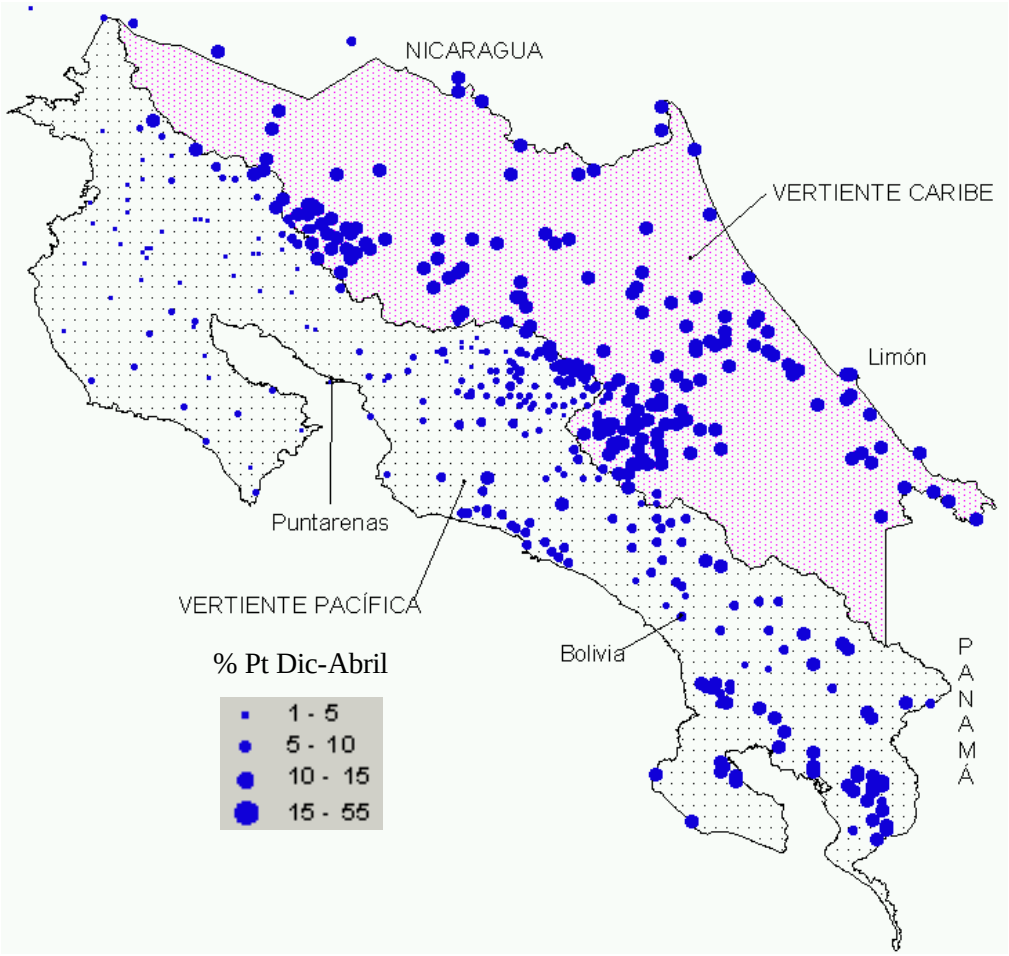


Figura 38: Distribución porcentual de la precipitación en Costa Rica durante los meses de diciembre-abril. Basado en datos publicados por el Instituto Meteorológico Nacional.

Vulnerabilidad de los recursos hídricos ante el cambio climático

El estudio sobre vulnerabilidad el recurso hídrico analizó el impacto de un cambio en la temperatura de 1 y 2 ^{o}C y un cambio en precipitación de ±15% en la vertiente Pacífica (cuencas ríos Grande de Térraba y Grande de Tárcoles) y ±10% en la vertiente Atlántica (cuencas río Reventazón) (Instituto Meteorológico Nacional, 2000.). La simulación se realizó con el programa CLIRUN3 (Kaczmarek 1994). Los resultados de la simulación indican que se espera una mayor variación en la descarga de la cuenca en la época de transición entre la estación seca y la lluviosa. Un incremento de 10 y 15% en la precipitación daría como resultado un incremento en escurrimiento de 23.8 y 75.5%, respectivamente. Por el contrario una reducción en la precipitación de 10 y 15% ocasionaría una disminución en la descarga de 5 y 29%, respectivamente. El modelo muestra más sensibilidad durante la estación lluviosa, por cuanto la mayoría de los cambios se esperarían que ocurran durante esta estación.

Entre los impactos genéricos citados para un aumento en el escurrimiento de la cuenca tenemos: mayor erosión, sedimentación, mayores problemas con avenidas e inundaciones y

restricciones en el aprovechamiento de los recursos hídricos para fines de riego, hidroeléctricos y consumo humano. Las alteraciones ocasionadas por el calentamiento global en el ciclo hidrológico podrían incluir cambios en la intensidad, volumen, duración y distribución de la precipitación; los cuales a su vez podrían magnificar el impacto de las tormentas, avenidas e inundaciones así como el de los huracanes. Desde el punto de vista económico y social esto afectaría la infraestructura vial, hidroeléctrica, de riego y alcantarillados, lo que podría tener severas implicaciones en el entorno urbano.

La estación Bolivia pertenece a la cuenca del río Pejibaye, el cual es un afluente del río General que forma parte de la cuenca del río Grande de Térraba. Basados en los resultados del presente estudio se esperaría que durante años Niño se presenten lluvias con periodos de retorno (Tr) iguales o inferiores a 5 años (máximo de 141mm) en tanto que durante los años Niña y los Neutros se esperarían eventos con Tr entre 5 y 10 años (hasta 180 mm por día). En otro documento (Fallas y Valverde, 2007) se analiza la relación entre dichas lluvias y los periodos de retorno de descargas máximas en 24, 48 y 72 horas.

El informe del Instituto Meteorológico Nacional (2000) incluye como parte de sus recomendaciones de política para mitigar los efectos del cambio climático que exista un marco de control de la tala de bosques en las cuencas, lo cual puede lograrse mediante el apoyo a instituciones dedicadas a la protección del bosque y a un manejo sostenible de la tierra a nivel de cuenca y el establecimiento de políticas de ordenamiento del territorio.

Conclusiones

En el presente trabajo se investigó la variación interanual en la precipitación total anual y los periodos de retorno para lluvias máximas en 24 horas para la estación Bolivia (No. (No.98011, 740 msnm); río Pejibaye, Pacífico Sur, Costa Rica durante 1969-2005 y su relación con los episodios frío (La Niña) y cálido (El Niño) de ENOS. La precipitación total anual no mostró ningún patrón o tendencia significativa para el periodo analizado. Tampoco se detectó ninguna tendencia o cambio en los periodos de retorno para la lluvia en 24h. Sin embargo, sí se encontró una diferencia significativa ($P< 0.05$) entre la precipitación total anual durante años Niña y Niño. Los resultados indican que las cuencas ubicadas en la región Pacífico Sur de Costa Rica pueden recibir hasta 673mm mas de lluvia durante los años de la Niña que en años Niño; esto implica que también el rendimiento hídrico de la cuenca sería mayor. Las lluvias máximas en 24 horas no mostraron ningún relación con las fases de ENOS; sin embargo el efecto indirecto de los ciclones tropicales ocasionaron valores extremos de lluvia en 24 horas. Durante los años Niña la tendencia fue a registrar lluvias mayores para iguales periodos de retorno comparados con los años Niño. Este último tiende a generar eventos con periodos de retorno (Tr) iguales o inferiores a 5 años (máximo de 141mm); en tanto que durante La Niña y los años Neutros predominan los eventos con Tr entre 5 y 10 años (hasta 180 mm por día). Los dos eventos extremos registrados en la estación con un periodo de retorno superior a los 150 años corresponden a una Depresión Tropical (1993) y a un huracán (19996) ocurridos en años neutros. Entre las posibles explicaciones de la no detección de cambios en las variables analizadas tenemos la variabilidad natural para una serie corta de datos, oscilaciones internas en las condiciones climáticas regionales y cambios asociados a factores de mesoescala tales como el calentamiento/enfriamiento del Mar Caribe, el Atlántico Norte y su impacto en la intensidad de los vientos alisios y el transporte de humedad. Se requieren estudios adicionales para

determinar si el patrón observado es particular de la estación analizada o sí aplica a otras regiones hidroclimáticas de Costa Rica.

Agradecimientos. El presente trabajo se realizó gracias al apoyo del contrato INCO-CT2004-510739. EPIC-FORCE. Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt. Los autores agradecen al Instituto Costarricense de Electricidad por suministrar los datos de lluvia diaria de las Estaciones, Bolivia, San Martín, Cristo Rey y Agua Buena. Se agradece al Dr. James Bathurst de la Universidad de NewCastle Upon Tyne por invitarnos a participar en este proyecto.

Referencias

ACAN-EFE. 2003. Prevén invierno irregular en istmo. Internacionales. Nacion.com. http://www.nacion.com/ln_ee/2003/abril/20/mundo6.html

ACAN-EFE. 2002. Hondureños que clamaban por agua ahora se quejan por abundancia de lluvia. Miércoles 12 de junio, 2002 10:41:00 (Hora local). http://www.nacion.com/ln_ee/2002/junio/12/ultima4.html

ACAN-EFE. 2001. Defensa civil de Nicaragua vigila ríos del Caribe ante eventuales inundaciones. Lunes 13 de agosto, 2001 11:35:00 (Hora local). http://www.nacion.com/ln_ee/2001/agosto/13/ultima6.html

ACAN-EFE. 2000. Istmo se quedará sin bosques en 15 años. Natura grita agobiada. http://www.nacion.com/ln_ee/2000/julio/09/mundo4.html

Adame Garza, Jorge y Estrada Bellmann, Pedro. 2003. Efecto de una doble concentración de bióxido de carbono en la atmósfera sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río Guayalejo-Tamesí en el estado de Tamaulipas, México. Revista de Climatología. Vol. 3:27-44. http://www.geocities.com/reclim05/reclim03d.pdf

Adamson Badilla Marcos. Desastres en Centroamérica: una ancla para el desarrollo humano sostenido y una agenda para estrategia de prevención. Centro de Estudios Económicos y Ambientales CIESA. Presentando en el Foro Mitch +5 Diciembre, 2003. 17p.

Adger N, et al. 2007. Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. http://www.ipcc.ch 23pp.

Agencia EFE. 2001. Latinoamérica mantiene alta vulnerabilidad en materia ambiental, según ONU. Viernes 18 de mayo, 2001 11:54:00 (Hora local). http://www.nacion.com/ln_ee/2001/mayo/18/ultima4.html

Agencia EFE. Río de Janeiro. 2000. Tala en Amazonia puede alterar clima en hemisferio norte Deforestación sin piedad. http://www.nacion.com/ln_ee/2000/agosto/13/mundo10.html

Aguilar et.al. 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. Journal of Geophysical Research, Vol. 110:D23107.

Alfaro, Eric J. 2007. Escenarios climáticos para temporadas con alto y bajo número de huracanes en el Atlántico. Pág. 1-13, 1-Jun:.Vol. 7 Revista de Climatología. http://webs.ono.com/reclim/reclim07a.pdf

Alexander, L. V., et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, J. Geophys. Res., 111, D05109. http://hadobs.metoffice.com/hadex/HadEX_paper.pdf

Alvarado L. y Alfaro E. 2003. Frecuencia de los ciclones tropicales que afectaron a Costa Rica durante el siglo XX. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, 10(1): 1-11.

Alley R, et al. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 21p. http://www.ipcc.ch

Australian Goverment Bureau of Meteorology. 2007. Southern Oscillation Index (SOI). Canberra. Australia. Disponible en http://www.bom.gov.au/climate/current/soi2.shtml

Baldwin, M.P. et al., 2001.The Quasi-Biennial Oscillation. Rev. Geophys., **39**, 179–229.

Biondi, Franco and Cayan D. R. 2001. North Pacific Decadal Climate. Variability Since AD. 1661. Journal of Climate, Volume 14, Number 1, pp. 5-10, January 2001. http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/pubs/biondi2001/biondi2001.html

Brown, B.G. and Katz, R.W. 1995: Regional analysis of temperature extremes: Spatial analog for climate change?, J. of Climate 8:108–119.

Cáceres Luis, Mejía Raul y Ontaneda, Gonzalo. s.f. Evidencias del cambio climático en Ecuador. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Iñaquito 700 y Corea. Quito-cuador. http://www.unesco.org.uy/phi/libros/enso/caceres.html.

Carr, R., 2007, XLStatistics 06.08.27, XLent Works, Australia. http://www.deakin.edu.au/~rodneyc/xlstats.htm

Cavazos, Teresa y Rivas, David. 2004. Variability of extreme precipitation events in Tijuana, Mexico. Climate Research. Vol. 25: 229–243: 229-243.

Clarke, M. L. and Rendell, H. M. 2006. Hindcasting extreme events: the occurrence and expression of damaging floods and landslides in Southern Italy. Land Degradation & Development VoL: 17: NO: 4: 365-380. 2006

Climate Prediction Center. 2007 Cold and Warm Episodes by season 1951-2007. National Weather Service. NOAA-USA. http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

Chicago Tribune Web Edition. 2007. FEMA: More than $12M in grants and loans awarded to flood victims. Associated Press. 1:09 PM CDT, October 19, 2007.

Costa Rica. sf. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). Impacto directo de los desastres naturales declarados en Costa Rica: 1988-2001. Sistema de Indicadores sobre Desarrollo Sostenible (SIDES).
http://www.mideplan.go.cr/sides/ambiental/32-1.htm

Diamond, H.J. 2006: Review of recent tropical cyclone climatological research. Island climate update, v. 72, 6 (1 p.) http://www.niwascience.co.nz/ncc/icu/2006-09/icu-2006-09.pdf

Diaz, H.F. and Quayle, R.G.1980. Climate of the United States since 1895: spatial and temporal changes. Monthly weather review, 108 (3), 249-266.

Doughton, Sandi. 2005. The truth about global warming. Seattle Times. Tuesday, October 11, 2005 - Page updated at 01:23 PM.
http://seattletimes.nwsource.com/html/nationworld/2002549346_globewarm11.html

Ekström, M., et. al. 2005. New Estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies. J. Hydrology 300:234–251.

Emanuel, K.A. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature, 436 (4-August2005): 686-688.

Enquist, C.A.F. 2002. Predicted regional impacts of climate change on the geographical distribution and diversity of tropical forests in Costa Rica. J. Biogeography. 29(4): 519-534.

Fallas, J. y Valverde, C. 2007. Análisis de descargas máximas en 24, 48,72 horas e instantáneas y su relación con ENOS, ciclones tropicales y uso-cobertura de la tierra en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica. Proyecto EPIC-FORCE-Costa Rica. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. 41p.

Fonseca, Pablo. Q. 2007. Cambio climático producirá sequías e inundaciones aquí. Noticias Aldea Global. La Nación Digital. pfonseca@nacion.com
http://www.nacion.com/ln_ee/2007/agosto/14/aldea1199145.html

Fowler, H. J. and Kilsby, C. G. 2003. A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. International Journal of Climatology. VoL. 23. N0. 11:1313-1334.

Fowler, H.J., et. al. 2005. New Estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 1. Assessment of control climate. J. Hydrology 300:212–233.

Frich1, P. et.al. 2002.Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research, Vol. 19: 193–212.

Fueglistaler, S. and Q. Fu, 2006: Impact of clouds on radiative heating rates in the tropical lower stratosphere. J. Geophys. Res., 111, D23202. http://www.atmos.washington.edu/~qfu/Publications/jgr.fueglistaler.2006.pdf

Fu, Q., and Johanson, C. M.. 2005. Satellite-derived vertical dependence of tropical tropospheric temperature trends. Geophys. Res. Lett., 32, L1070. http://www.atmos.washington.edu/~qfu/Publications/grl.fu.2005.pdf

Gilleland, Eric and Katz, Richard W. 2006. Analyzing seasonal to interannual extreme weather and climate variability with the extremes toolkit. Research Applications Laboratory, National Center for Atmospheric Research. http://www.assessment.ucar.edu/pdf/Gilleland2006revised.pdf.

Greenpeace. 2007. Group: Logging, global warming to trigger more floods. January 31, 2007. http://www.abs-cbnnews.com/storypage.aspx?StoryId=26513

Gray, William M. et. al. 1999. Extended range forecast of Atlantic seasonal hurricane activity and us landfall strike probability for 1999. http://hurricane.atmos.colostate.edu/Forecasts/1999/fcst99/

Grove, Richard H. 1998. Global impact of the 1789-93 El Niño. Nature 393, 318-319.

Guha-Sapir, D. and argitt, D. Hoyois. 2004. Thirthy years of natural disasters 1974-2003: The numbers, Presses Universitaires de Louvain: Louvain-la Neuve. [ID n202] http://www.em-dat.net/publications.htm

Karl T. R. and Easterling, D. R. 1999. Climate extremes: selected review and future research directions. Clim Change 42: 309–325.

Haylock, et. al. 2006. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. Journal of climate, 19, 1490-1512.

Instituto Meteorológico Nacional. 2005. Vulnerabilidad Actual de la zona noroccidental del Valle Central de Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía. San José, Costa Rica Marzo 2005. 57p.

Instituto Meteorológico Nacional. 2000. Primera comunicación nacional ante la convención marco de cambio climático. Ministerio del Ambiente y Energía. 116p

IPCC. 2001. Climate Change 2001:Working Group I: The Scientific Basis. Appendix I - Glossary. p.790. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/pdf/TAR-APPENDICES.PD

Jiménez Pérez, Nayibe. 2006. Inventarios históricos de desastres como instrumentos para la gestión de riesgos una visión del caso Colombiano. Jornadas Iberoamericanas sobre inundaciones y desastres naturales AECI-CYTED. Antigua (Guatemala), 5 a 9 de junio de 2006 36p. http://hercules.cedex.es/hidraulica/PROHIMET/GU06/Taller2/Jimenez.pdf

Jiménez, Quírico. 2005. Menos bosques, más inundaciones. El precio de la tala es muerte y destrucción. http://www.nacion.com/ln_ee/2005/enero/17/opinion5.html

Kaczmarek, Zdzislaw. 1994. Water Balance Model CLIRUN_3_1. Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences. http://www.igf.edu.pl/climate/clirun_3.htm

Kaimowitz, David. 2005. Logging and Floods: A Watertight Argument? Arborvitae. No. 27: p.10. . http://www.panda.org/downloads/forests/arborvitae27.pdf

Karl, T.R., 2006. Changes in intense precipitation events: What do we know? (Nowcast) Bulletin of the American Meteorological Society, 87 (6), 734-735.

Karl T R, Easterling DR.1999. Climate extremes: selected review and future research directions. Clim Change 42: 309–325.

Kerr, R. A., 2006. A Tempestuous Birth for Hurricane Climatology. Science, 312 (5-May-2006):676-678.

Khanal, N. R., Shrestha, M and Ghimire, M. L. 2007. Preparing for Flood Disaster: Mapping and Assessing Hazard in the Ratu Watershed, Nepal . The International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD).
http://books.icimod.org/index.php/downloads/publication/134

Kiladis, G. y H. F. Diaz. 1989. Global climatic anomalies associated with extremes of the Southern Oscillation. Journal of Climate, 9, p.1069-1090.
http://ams.allenpress.com/archive/1520-0442/2/9/pdf/i1520-0442-2-9-1069.pdf

Klotzbach, P.J. 2006. Trends in Global Tropical Cyclone Activity over the past Twenty Years (1986-2005). Geophysical Research Letters, 33, L100805.

Klotzbach1, Philip J. and Gray, William M. 2006. Summary of 2006 Atlantic tropical cyclone activity and verification of author's seasonal and monthly forecasts. pp.44-47. Department of Atmospheric Science, Colorado State University. Fort Collins, CO 80523.
http://typhoon.atmos.colostate.edu/forecasts/2006/nov2006/nov2006.pdf

La Nación. 1987. Prevén peor sequía en últimos 10 años. La Nación, San José, CR. Nov 8:6A.

Landsea, C. W. 1993. A climatology of intense (or major) Atlantic hurricanes. Mon. Wea. Rev., 121, 1703-1713.

Landsea, C. W. and Gray, W. M. 1992. The strong association between western Sahelian monsoon rainfall and intense Atlantic hurricanes. J. Climate, 121, 1703-1713.
Landsea, et. al. 1996. Downward trends in the frequency of intense Atlantic hurricanes during the past five decades. Geo. Res. Letters, 23, 1697-1700.

Landsea, C.W., B. Harper, K. Hoarau, J. Knaff. Can We Detect Changes in Extreme Tropical Cyclones? Science, 313 (28-July-2006): 452-454.

Landsea, C.W., 2005. Hurricanes and Global Warming. Nature, 438 (29 December 2005): E11-12.

Levinson, D.H., et. al. 2006. Annual analyses of basin and hemispheric tropical cyclone indices. 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 24 - 28 April 2006, Monterey, CA. American Meteorological Society, Boston, MA, (2C.4) 5 p. (April 2006).

Lott, N., and Ross. T. 2006. Tracking and evaluating U.S. billion dollar weather disasters, 1980-2005. 86th AMS Annual Meeting, 29 January - 2 February 2006, Atlanta, Georgia. American Meteorological Society, Boston, MA, (1.2), 7 p.

Mccarthy, Michael. 2007. "Why 'extreme events' are likely to become the norm". Independent, The (London). Jun 26, 2007. FindArticles.com. 10 Oct. 2007. http://findarticles.com/p/articles/mi_qn4158/is_20070626/ai_n19321249

Miranda, M.; Otoya, M. y Gutiérrez, M. 2005. Revisión de las políticas y medidas de adaptación actuales ante la vulnerabilidad del sistema hídrico al clima actual en el área del proyecto. Proyecto Adaptación del Sector Hídrico al Cambio Climático. Proyecto Fomento de las Capacidades para la Etapa II Adaptación al Cambio Climático en Centroamérica, México y Cuba. ACCII-PNUD-IMN. Centro Internacional de Política Económica de la Universidad Nacional (CINPE-UNA). San José, Costa Rica. 84p.

Naciones Unidas. Objetivos de desarrollo del Milenio Informe de 2007. 26p. http://www.un.org/spanish/millenniumgoals/report2007/mdgreport2007r2.pdf

Nandintsetseg, B.; Greene, J. S. and Goulden, C. E. 2007. Trends in extreme daily precipitation and temperature near lake Hövsgöl, Mongolia. International Journal of Climatology. VoL: 27 NO: 3: 341-347.

Nicholls N and Murray W.1999.Workshop on indices and indicators for climate extremes: Ashville, NC, USA, 3–6 June 1997—Breakout Group B: Precipitation. Clim. Change 42: 23–29.

Osnos, Evan. 2006. The hidden cost of your hardwood floor. The demand for Chinese goods is driving destructive logging around the globe. Tribune special report. December 18, 2006. http://www.chicagotribune.com/news/specials/chi-china-special,0,6789511.special

Pachauri, R. K. 2002. "Is there a nexus with global climate change? - Extreme Weather". UN Chronicle. Dec 2002. http://findarticles.com/p/articles/mi_m1309/is_4_39/ai_96951869

Pauling, A. and Paeth, H. 2007. On the variability of return periods of European winter precipitation extremes over the last three centuries. Journal: Climate of the Past Year: 2007 Vol: 3 Issue: 1

Pérez, Carlos A., et. al. sf. Evidencias de cambio climático en Colombia: Tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. http://www.unesco.org.uy/phi/libros/enso/poveda.html

Pielke, R.A. et. al. 2005. Hurricanes and Global Warming. Bulletin of the American Meteorological Society, 86(11): 1571-1575.

Pielke, Roger, Jr. and Landsea, Christopher W. 1999. La Niña, El Niño, and Atlantic Hurricane Damages in the United States. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80, 2027-2033. http://www.aoml.noaa.gov/hrd/Landsea/lanina/

Pilon, P. J. and Harvy, K. D. 2001. Consolidated Frequency Analysis (CFA) versión 3.1. Reference manual. Environmental Canada. Ottawa, Ontario, Canada. 1993. 91p. + anexos. Disponible en http://www.trentu.ca/academic/wsc/software.shtml

Ponce, V. M. 1989. Engineering Hydrology, Principles and Practices. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. http://ponce.sdsu.edu/330textbook_hydrology_chapters.html

Pounds, A. and Puschendorf, R. 2004. Clouded futures. Nature. Vol 427. January: 107-108.

Programa Estado de la Nación. 2004. Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2004. Proyecto Estado de la Nación, San José, Costa Rica. . http://www.estadonacion.or.cr/

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. La reducción de riesgos de desastres: Un Desafío para el desarrollo, un informe mundial.. Dirección de Prevención de Crisis y de Recuperación. 2004. 146p. (disponible en www.undp.org/bcpr)

Quesada Sofía y Arlet, Alejandro. 2007. "Con el agua en la cintura empecé a pegar gritos ". Comisión de Emergencias estima daños en más de ¢100 millones. aarley@aldia.co.cr. Al Día, Costa Rica. http://www.aldia.co.cr/ad_ee/2007/octubre/05/nacionales1265086.html

Retana, José y Solano, Johnny. 2000. Relación entre las inundaciones en la cuenca del tempisque, el fenómeno de La Niña y los rendimientos de arroz de secano. Gestión de Desarrollo, Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica. 9p. http://www.imn.ac.cr/publicaciones/

Retana, José y Villalobos Roberto. 2000. Caracterización pluviométrica de la fase cálida de ENOS en Costa Rica con base en probabilidades de ocurrencia de eventos en tres escenarios: seco, normal y lluvioso. Top. Meteor. Oceanog., 7(2):124-131. http://www.imn.ac.cr/publicaciones/

Retana, José y Villalobos, Roberto. 2001. Eventos extremos meteorológicos en Linda Vista, Valle del Guarco, Cartago. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. 9(1):49-56. http://www.imn.ac.cr/publicaciones/

Retana, José y Villalobos, Roberto. 2003. Impacto social del fenómeno El Niño. Un recuento de 1977 – 1978. Top. Meteoro. Oceanog. 10 (1) 36-40. http://www.imn.ac.cr/publicaciones/

Reuters Foundation. 2006. Floods in southeast Asia force thousands to flee. 23 Dec 2006 08:30:00 GMT AlertNet. http://www.alertnet.org/thenews/newsdesk/SP142366.htm

Sanker, SriGowri and Nakano, Hajime. (Eds). 2006. Natural Disaster Data Book-2005 (An Analytical Overview). Asian Disaster Reducction Center. Japan. 88p. http://www.adrc.or.jp/publications/databook/databook_2005_eng/eng.html

Santer, B.D, et. al. 2005. Amplification of Surface Temperature Trends and Variability in the Tropical Atmosphere. Science, 309, 1551-1556. http://www.atmos.washington.edu/~qfu/Publications/science.santer.2005.pdf

Shein, K., A., (Ed.). 2006. State of the Climate in 2005. Bulletin of the American Meteorological Society, **87**, S1-S102.

Shein, K., A. 2006. Assessing the long-term representativeness of short wind records. 86th AMS Annual Meeting, 29 January - 2 February 2006, Atlanta, Georgia. American Meteorological Society, Boston, MA, (18 PROB 9.10), 4 p.

Smith, T.M., Yin, X. and Gruber, A. 2006. Variations in annual global precipitation (1979-2004), based on the global precipitation climatology project 2.5° Analyses. Geophysical Research letters, 33, L06705.

Solera, C. 2000. Impacto de El Niño en el sector agua potable de Costa Rica durante 1997-1998. Congreso sobre la Reducción de Impactos de Variabilidad Climática: El Caso de El Niño de 1997-1998 en Costa Rica. Acueductos y Alcantarillados. San José, 3 y 4 de febrero de 2000.

Solano, J.; Retana, J. y Villalobos, R. 2002. Inundaciones. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. 9(2):104-122. http://www.imn.ac.cr/publicaciones/

Soon W, et. al. 2003. Reconstructing Climatic and Environmental Changes of the Past 1000 Years: A Reappraisal. Energy & Environment, Volume 14, Numbers 2-3: 233-296(64).

Tank, A. M. and Klein, G. 2006. Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia. Journal Of Geophysical Research, VOL. 111, D16105, http://www.knmi.nl/publications/fulltexts/2005jd006316.pdf

The Seattle Times. 2005. Proving global warming. A world of evidence says global warming is real. Sunday, October 9, 2005: Page updated at 12:00 a.m. http://seattletimes.nwsource.com/news/nation-world/globalwarming/1.html

Trenberth, K. 2005. Uncertainty in Hurricanes and Global Warming. Science, 308: 1753-1754.

Valverde, L. 2001. Nuevo ministro alerta sobre sequía. La República. San José, CR. Ago 10:8A

Wardlaw, R. B. ; Hulme, M; and Stuck Y. 1996. Modelling the Impacts of Climatic Change on Water Resources Water and Environment Journal 10 (5): 355–364.

Wettstein, J. J. and Mearns, L. O. 2002. The influence of the North Atlantic-Arctic Oscillation on mean, variance and extremes of temperature in the Northeastern United States and Canada, J. of Climate 15:3586–3600.

Webster, P.J., et. al. 2005. Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. Science, 309 (16 September 2005): 1844-1846.

Xu, M., et. al. 2006. Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969 - 2000: evidence from direct ground measurements of wind speed. Journal of geophysical research, atmospheres (accepted 7/06). NCDC Online.

Yunling, He and Yiping, Zhang. 2005. Climate Change from 1960 to 2000 in the Lancang River Valley, China. Mountain Research and Development Vol 25 No 4 Nov 2005: 341–348

Peterson, Thomas C. et. al. 2003. Detección del cambio climático. Boletín de la Organización Meteorológica Mundial, Vol. 52, Nº. 3, 2003: 252-258.

Análisis de descargas máximas en 24, 48,72 horas e instantáneas y su relación con ENOS, ciclones tropicales y uso-cobertura de la tierra en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica. [3]

Jorge Fallas Gamboa (jfallas56@gmail.com), Investigador Proyecto EPIC-FORCE-UNA y Carmen Valverde Morales, Investigadora Proyecto EPIC-FORCE y profesora Escuela de Ciencias Ambientales, UNA (ginette.valverde@gmail.com).

Palabras claves Cambio climático, eventos hidrológicos extremos, bosques, gestión de cuencas, cuenca Pejibaye, Costa Rica

RESUMEN

Se reporta el análisis del comportamiento de la descarga (variación interanual, máxima en 24, 48, 72 horas e instantánea) en la estación Pejibaye (No.98011, 360 msnm, 1975-1995), ubicada en la cuenca del mismo nombre, Pacífico Sur, Costa Rica. Se calcularon desviaciones de la media, periodos de retorno entre 1 y 200 años y se relacionaron con los episodios de ENOS, ciclones tropicales y los cambios en uso-cobertura de la cuenca. La cobertura forestal de la cuenca pasó de un 20% en 1970 a 3% en el año 2005; a partir de la década del 80 se observó un reemplazo de pastos por café en la sección norte y central de la cuenca, la cual alcanzó un 21% de cobertura en el año 2005. El coeficiente medio anual de escorrentía para los 21 años de estudio fue 61.5%; detectándose una diferencia significativa (Kruskal-Wallis P=0.04) entre la razón de escurrimiento (Q/P) de los diferentes episodios del ENOS. Durante los años Niña, el 63% de la precipitación se convirtió descarga, en tanto que en años Niño dicho valor descendió a un 54%. La prueba LSD de Fisher (alfa 0.05) detectó como significativa la diferencia Neutro-Niño. El balance de masa de la cuenca (Q_Pejibaye–P_Bolivia) indica que en promedio la evapotranspiración fue de 786 mm (CV=16%); así como durante los años Niño (785 mm), reduciéndose en los años neutros (718mm) y aumentando en los años Niña (909mm); sin embargo la prueba LSD de Fisher (P=0.05) solo detectó como significativa a la diferencia Niña-Neutro. Un 92% de la variabilidad en las desviaciones en la descarga anual se deben a la variación en las desviaciones de la media en precipitación. No se detectó ningún patrón o tendencia temporal significativa para el periodo analizado (1975-1995); auque los episodios de ENOS sí tienen una marcada influencia en la descarga media anual de la cuenca. Durante años Niña la escorrentía total anual fue mayor comparada con años Niño ó Neutros (Mann-Whitney, P=0.01). La diferencia en descarga media entre años Niña y Niño fue 641 mm en tanto que para años Neutro-Niño fue 170 mm (LSD de Fisher, alfa 0.05)..Los años Niña, en comparación con los Niño, tienden a generar eventos con descargas máximas mayores en 24hr (mediana 57.6 mm Vs 27.0 mm), 48hr (92,4 Vs 44.5mm) y 72hr (109.7mm Vs 54.3mm Vs); sin embargo debido al pequeño tamaño de la muestra y la alta variabilidad del set de datos las mismas no fueron detectadas como significativas (Kruskall-Wallis, P>0.059). Las descargas máximas en 24, 48 y 72 hr muestran una correlación positiva con el índice Oceánico El Niño (ONI, Niño3.4) de agosto, setiembre y octubre. La tendencia indica que al intensificarse la fase calida de ENOS se reducen las descargas máximas. La relación es menos consistente para años neutros y Niñas; sin embargo existe una mayor probabilidad de generar descargas mayores durante años Niña. No se observó ningún patrón en cuanto a descenso/ascenso en los periodos de retorno de

[3] Informe preparado en el marco del proyecto INCO-CT2004-510739. "EPIC-FORCE. Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt".

descargas máximas en 24, 48 y 72 horas durante el periodo 1975-1995. En general, los años Niño tienden a caracterizarse por eventos máximos en 24hr con períodos de retorno iguales o inferiores a 2 años (máximo de 36 mm) en tanto que los años Niña y neutros tienen eventos con periodos de retorno entre 2 y 10 años (36 a 98.8 mm por día). En síntesis, el análisis permite concluir que aun cuando el uso-cobertura de la tierra juega un papel importante en la respuesta hidrológica de la cuenca no puede amortiguar el efecto de variaciones climáticas severas como las ocasionadas por el ENOS y en especial por los ciclones tropicales. La evidencia indica que de acentuarse en el futuro los años Niño a consecuencia del calentamiento Global se podría esperar una reducción en la frecuencia de ciclones tropicales así como una reducción en las descargas máximas en 24hr en el río Pejibaye. Esto, aunado a una buena gestión de la cuenca podría asegurar ingresos para sus pobladores en el largo plazo. La recuperación del bosque en zonas degradadas y de fuerte pendiente; así como el uso de café con sombra y sistemas agroforestales-agrosilvopastoriles podrían ayudar a mitigar el efecto de avenidas no extremas.

ABSTRACT

On this paper we analyzed the relationship between ENOS, land-use-land-cover, instantaneous and maximum discharge in 24, 48, 72hr for Pejibaye river basin, South Pacific, Costa Rica between 1975 and 1995. Average annual discharge for Niño years was 965±160 mm, whereas during Niña years increased to 1905 ±560 mm and for non-ENSO years was 1442±455 mm. The differences were statistically significant (Mann-Whitney, $P< 0.05$). Niña years tend to generate more annual discharge than Niño and non-ENSO years (Fisher LSD, $P<0.03$). No significant differences were found in maximum discharge for 24hr, 48hr and 72 hr for ENSO episode. Maximum discharge in 24, 48 and 72hr showed a positive correlation with the Oceanic Niño Index (ONI, Niño3.4) of August, September and October. The relationship is less consistent for Niña and neutral years; nevertheless the tendency indicates that there is a greater probability of an increase in discharge during Niña years. The frequency of events by ENOS and for return periods of 2, 5, 10 and 20 years indicates that neither the cold nor the warm phase seem to exert a significant influence in maximum discharge in 24 hours (Chi-square; $P> 0,11$). In general, Niño years tend to be associated with events of 2 o less years return period (maximum 38 mm/24hr) whereas events during neutral and Niña years tend to have return periods between 5 to 10 years (38 to 76 mm/24hr). Maximum discharge in 48 and 72hr showed a similar behaviour. The station registered two extreme discharge events, one in 1973 (maximum water level 4.3m) associated to Hurricane Juana and another in 1993 (maximum water level 5,46 m) associated to Tropical Depression Gert; the return period of these events was estimated above 150 years. The hurricane destroyed the gaging station in 1996 and therefore there is no data on water level for this event; nevertheless judging by the 1993 event, it was stronger. Between 1970 and 2000 forest cover on the river basin changed from 20 to 3% and pasture land, the dominant land use of the watershed, was replaced by coffee plantations beginning in the early 80s; reaching 21% of total area in 2005. Coffee seems to exert a positive regulating function under normal rain conditions since floods in the river basin in recent dates have not been registered.

Introducción

Un evento climático extremo es aquel que tiene una baja frecuencia de ocurrencia en el tiempo en una localidad particular y por tanto entre uno y otro evento existen muchos años; sin embargo cuando ocurre causa un impacto severo en la naturaleza y/o en los bienes y servicios utilizados por los humanos (IPCC, 2001). Estos eventos son parte del comportamiento natural del clima; sin embargo en las últimas tres décadas han recibido gran atención por parte de la población, la prensa, la academia y los gobiernos por los efectos devastadores que ocasiona en el paisaje, los ecosistemas, las personas, sus bienes, la infraestructura y en la economía local y nacional (ACAN-EFE, 2000, 2001, 2002, 2003; Clarke and Rendell, 2006; Costa Rica. sf.; Guha-Sapir, Hargitt and Hoyois, 2004; Karl and Easterling,1999; Khanal, Shrestha and Ghimire, 2007; Instituto Meteorológico Nacional, 2005; Jiménez, 2005; Landsea,1993; Landsea and Gray, 1992; Landsea, et. al. 1996; Programa Estado de la Nación, 2004; Quesada y Arlet, 2007; Retana y Villalobos, 2003; Sanker and Nakano, 2006; Xu, et.al., 2006; Wardlaw, Hulme, and Stuck, 1996).

Las crecidas extraordinarias (aumento inusual en el nivel de agua en el cauce) forman parte del comportamiento natural del sistema hidrográfico de la cuenca y son el resultado de la combinación de condiciones de alta humedad en el suelo y lluvias abundantes y de larga duración asociadas a fenómenos climáticos tales como los frentes fríos, depresiones tropicales y en especial huracanes. Dichos eventos en presencia de personas, bienes o infraestructura vulnerable se convierten en un desastre, el cual a su vez ocasiona una emergencia que se traduce en pérdida de vidas, bienes e infraestructura (Easterling et al., 2000; Fonseca, 2007; Kaimowitz, 2005). Los impactos sociales y económicos de los eventos climáticos extremos afectan con mayor severidad a los grupos sociales más pobres del planeta y por tanto constituyen un obstáculo al desarrollo humano y una amenaza para el cumplimiento de los objetivos de Desarrollo del Milenio (Adamson, 2003; Costa Rica. sf.; United Nations, 2007).

Con frecuencia, la prensa, los grupos ambientalistas y los políticos asocian las inundaciones con la deforestación (legal e ilegal), la explotación de bosques (Kaimowitz, 2005; Osnos, 2006; Reuters Foundation, 2006) y el cambio climático (Doughton, 2005; Geenpeace, 2007; The Seattle Times, 2005; Yunling, and Yiping, 2005) y en muy pocas veces se reconoce el papel que juega la falta de planificación urbana y la invasión de las riberas y planicies de inundación (Solano, Retana y Villalobos, 2002). Sin embargo a pesar del interés generalizado en el tema, existe poca evidencia científica sobre el rol del bosque y el uso-cobertura de la tierra en la magnitud y frecuencia de los avenidas extremas; así como sobre el rol que podría jugar ante los escenarios de cambio climático.

En los últimos 30 años los eventos extremos han provocado pérdidas económicas anuales crecientes. Por ejemplo, cifras del PNUD indican que en los años 60 las pérdidas económicas se estimaron en US$75.500 millones; en los años 70 el montó ascendió a US$138.400 millones; en los 80s pasó a US$213.900, y finalmente en los 90 creció hasta alcanzar la suma de US$659.900 millones; la mayoría de estas cifras corresponden a países desarrollados (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2004). El número de eventos y de personas afectadas también ha aumentado en los últimos 30 años (Guha-Sapir, Hargitt and Hoyois, 2004; Fallas y Valverde, 2007a;Solano, Retana y Villalobos, 2002).

El calentamiento global, su impacto en el cambio climático (incluida la variabilidad climática) y el posible efecto (incremento/reducción) en la frecuencia y/o magnitud de los extremos hidroclimáticos ha sido abordado por diversas investigaciones y publicaciones tanto en los medios de comunicación de masas como científicas a nivel mundial (ACAN-EFE, 2001; Adame y Estrada, 2003; Biondi and Cayan, 2001; Fu and Johanson, 2005; Fueglistaler and Fu, 2006; Jiménez, 2006; Mccarthy, 2007; Pachauri, 2002; Pounds and Puschendorf, 2004; Santer et. al., 2005). Sin embargo en ninguno de los estudios previos se analiza el comportamiento de las avenidas extremas y su expresión como inundaciones. A nivel mundial, la investigación realizada hasta la fecha indica que el comportamiento temporal y espacial de los extremos de precipitación y temperatura es heterogénea y que no es posible hacer afirmaciones o generalizaciones para regiones sin datos y menos aun sobre su tendencia en el futuro cercano (Brown and Katz, 1995; Campos, s.f; Cavazos y Rivas, 2004; Clarke and Rendell, 2006; Ekström, et. al., 2005; Fonseca, 2007; Fowler, et. al., 2005; Fowler and Kilsby, 2003; Haylock, et. al., 2006; Karl and Easterling,1999; Gilleland and Katz, 2006; Pauling, and Paeth, 2007; Wettstein and Mearns, 2002).

La investigación citada en los párrafos anteriores permite afirmar que existe una tendencia positiva hacia el aumento en los índices de precipitación extrema; la cual está asociada según algunos autores al calentamiento global (Alfaro, 2007; Frich, et..al., 2002; Goswami, et. al., 2006; Nicholls and Alexander, 2007). Dado esto escenario, existe una preocupación en la comunidad científica y los políticos sobre el posible incremento en la frecuencia y/o magnitud de las avenidas asociadas a lluvias extremas; las cuales a su vez podrían, en presencia de poblaciones vulnerables, generar inundaciones cada vez más severas y catastróficas.

La respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos hidrometeorológicos extremos es el resultado de la combinación de una serie de factores y condiciones particulares, sin embargo, en el presente trabajo se analiza el tema desde la perspectiva de la interacción evento-uso-cobertura de tierra en la cuenca. Las preguntas, que con frecuencia se hacen los académicos, políticos y el publica en general son:

- ¿Cuál es la función reguladora del bosque ante avenidas extremas?
- ¿Hasta qué punto su remoción incrementa la magnitud y/o frecuencia de dichos eventos?
- ¿Puede la repoblación forestal aminorar los impactos adversos de dichos eventos extremos?.
- ¿Están los eventos hidroclimáticos extremos asociados al ENOS?
- ¿Existen otras causas por las cuales se ha incrementado el impacto de las inundaciones?
- ¿Puede gestionarse la cuenca para reducir el impacto de los eventos hidroclimáticos extremos?

En la percepción popular se asocia la presencia de bosques con la existencia de agua y la deforestación (y el subsiguiente cambio de uso de la tierra) con escasez de agua en la estación seca e inundaciones en la estación lluviosa. La evidencia en la literatura hidrológica indica que el bosque, y en general toda vegetación, ejerce un papel regulador sobre el ciclo hidrológico; sin embargo en presencia de eventos hidrometeorológicos extremos es muy probable que su efecto mitigador sea mínimo (Bruijnzeel, 1990; 2004; Bruijnzeel y Hamilton, 2000; Calder, 2002; Lee,1978). La percepción popular sobre los beneficios hidrológicos del bosque tiene implicaciones políticas y económicas de gran impacto. Por ejemplo, en China se está

reforestando un área equivalente a Whales (Inglaterra) bajo el supuesto de que esto reducirá el severo impacto ocasionado por las inundaciones; en tanto que el sureste Asiático se ha prohibido el aprovechamiento forestal bajo la premisa de que magnifican el efecto de las inundaciones (Calvez, 2004). En Costa Rica, se han tomado medidas similares en cuanto al aprovechamiento ilegal del bosques.

La investigación hidrológica realizada hasta la fecha indica que en aquellas cuencas donde el bosque es la vegetación original, este provee la mejor regulación hidrológica natural; sin embargo no puede prevenir avenidas extraordinarias (UN FAO and CIFOR, 2005). Por otro lado, cuando el bosque es reemplazado por otras coberturas y usos de la tierra (Ej. pasto, cultivos permanentes, cultivos anuales, uso residencial), existen otros aspectos tales como la geología, las propiedades del suelo (Ej. conductividad hidráulica, presencia de capas impermeables, profundidad), el contenido de humedad del suelo previo al evento y el porcentaje de área impermeable que deben considerarse al explicar el cambio en la magnitud de variables hidrológicas tales como las descargas máximas diarias y en especial las descartas instantáneas en la cuenca (Bruijnzeel, 2004). El recuadro siguiente tomado del informe sobre bosques e inundaciones publicado por UN-FAO y CIFOR en 2005 ilustra las percepciones y controversias sobre los beneficios del bosque:

Bosques e inundaciones: una percepción temprana en los forestales de los Estados Unidos de America

"La lluvia que cae sobre una pendiente desprovista de vegetación se comporta diferente; no es interceptada por las copas de los árboles ni retenida por el suelo; ni su flujo es retardado por los árboles y mantillo forestal. La infiltración se reduce hasta en un 50% comparado con los bosques y el agua llega hasta los cauces en un corto tiempo, lo cual causa inundaciones. Es por tanto cierto que los *bosques tienden a prevenir las inundaciones*. Pero esta influencia beneficiosa de los bosques es importante solo cuando el bosque cubre una gran parte de la cuenca. Sin embargo, aun bajo estas condiciones, es *posible que el bosque no pueda prevenir las inundaciones*. El mantillo forestal, puede retardar el flujo de agua hasta que alcance su estado de saturación, una vez pasado este punto, el agua que llega al mantillo drenará hacia los causes casi tan rápido como sobre un suelo sin cobertura forestal". *De: Gifford Pinchot, A Primer for Forestry, 1905*

La esponja del Himalaya

"Los bosques del Himalaya normalmente ejercen un efecto de esponja; se humedecen con la lluvia y almacenan el agua; la cual liberan lentamente en un largo periodo de tiempo. Cuando el bosque es talado, los ríos de tornan "chocalotosos" y amplían sus márgenes durante la estación lluviosa y la reducen durante la estación seca"
De: Myers 1986

En las ultima dos décadas se ha observado un aumento en los impactos asociados a inundaciones (Fallas y Valverde, 2007a; Guha-Sapir, Hargitt and Hoyois, 2004); sin embargo no existe evidencia de que dicho aumento esté asociado a un incremento en la magnitud de los eventos hidroclimáticos que los ocasionan. Con frecuencia el aumento en el número de sitios afectados, número de damnificados y viviendas afectas y en general el incremento en las

perdidas económicas son el resultado de ausencia de planificación territorial la cual se traduce en ocupación de las planicies de inundación y las riberas de los ríos (Solano, Retana y Villalobos, 2002; Instituto Meteorológico Nacional, 2005).

La conversión de áreas boscosas a terrenos agropecuarios y especialmente a zonas residenciales modifican severamente la respuesta hidrológica de la cuenca hidrográfica, facilitando procesos erosivos y aumentando la vulnerabilidad de los seres humanos y la infraestructura ubicada en las riberas de los ríos y en las planicies de inundación (Solano, Retana y Villalobos, 2002). El bosque y en general la cobertura natural ejercen un papel regulador o retardador limitado ante eventos climáticos extremos; aunque sí mantienen la integridad hidrológica de la cuenca y regula el impacto de eventos menores.

PERCEPCIONES NO PROBADAS	PERCEPCIONES PROBADAS
• El bosque incrementa la precipitación local. • El bosque reduce el impacto de las gotas de lluvia bajo el dosel. • El bosque previene grandes inundaciones • El bosque conserva el agua durante periodos de sequía. • La tala del bosque reducirá la precipitación, secará los ríos y manantiales. • El bosque aumenta la capacidad de infiltración del suelo. • El bosque es sinónimo de recarga de acuíferos.	• El mantillo forestal protege el suelo de la erosión y de la energía cinética de las gotas de lluvia que penetran a través del bosque (escurrimiento foliar y precipitación directa). • El bosque mantiene la capacidad natural de infiltración del suelo. • Las raíces crean macroporos que facilitan la percolación y la recarga de los acuíferos cuando estos existen. • El sistema radicular favorece cohesión del suelo. • El bosque intercepta lluvia (evaporación de superficies húmedas) • El bosque consume agua como parte de su proceso de transpiración.

Los escenarios de cambio climático y documentos conexos elaborados en Costa Rica (Instituto Meteorológico Nacional, 2000, 2005; Miranda, Otoya, y Gutiérrez, 2005; Retana y Solano, 2000) no abordan el tema de los extremos hidroclimáticos ni el papel que podría jugar el bosque y en general el manejo del uso-cobertura de la tierra en la cuenca ante las predicciones de un incremento en las lluvias y avenidas extremas. Entre las recomendaciones de política para mitigar los cambios esperados se recomienda que exista una marco de control de la tala de bosques en las cuencas, esto puede lograrse mediante el apoyo a instituciones dedicadas a la protección del bosque y a un manejo sostenible de la tierra a nivel de cuenca y el establecimiento de políticas de ordenamiento del territorio (Instituto Meteorológico Nacional, 2000).

El tema aumenta en complejidad si consideramos los efectos y sinergias de fenómenos climáticos globales tales como El Niño Oscilación Sur (ENOS) , la oscilación decadal , el calentamiento global, la presencia de perturbaciones tropicales (Ej. depresiones, tormentas tropicales y huracanes) y el cambio climático (Nicholls and Alexander, 2007;Yunling, and Yiping, 2005). El estudio de la interacción bosque-lluvias extremas a nivel de la cuenca

hidrográfica es otro tema complejo pues intervienen una serie de factores tales como su tamaño, las condiciones climatológicas locales y globales, la duración, extensión e intensidad de la tormenta, la topografía, la geología (en especial la presencia de acuíferos), el uso-cobertura de la tierra, las practicas agrícolas, los suelos y en especial su contenido de humedad previo al evento extremo.

Dada la incertidumbre de los resultados obtenidos hasta la fecha en cuanto a la relación bosques-avenidas y a la respuesta localizado de los eventos extremos no es posible utilizar estimaciones globales para crear escenarios nacionales y/o locales. En este contexto, el objetivo del presente trabajo es aportar al conocimiento del comportamiento de la descarga anual, máxima en 24, 48 y 72 horas e instantánea en la cuenca del río Pejibaye, Pacífico Sur y su relación con el uso cobertura de la tierra, la interacción con los episodios de ENOS (Niño, Niña) y los ciclones tropicales.

Materiales y Métodos

Área de estudio: Cuenca del río Pejibaye

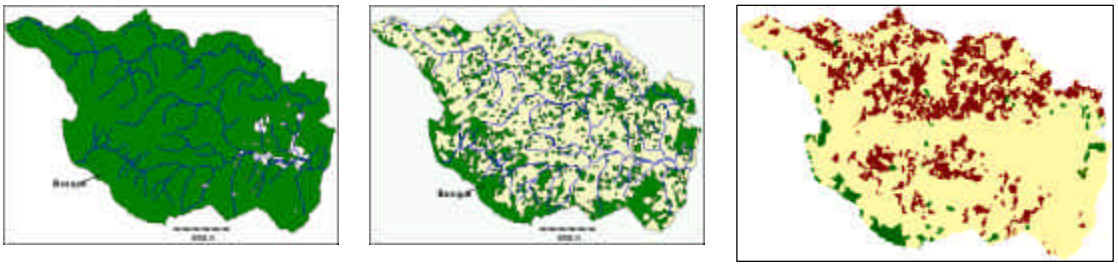
Costa Rica, con 51.100 Km2, es el segundo país más pequeño de Centro América; limita al norte con Nicaragua, al sur con Panamá, al este con el Mar Caribe y al oeste con el Océano Pacífico. Su población para el año 2005 era de 4.3 millones de personas; de la cual más del 50% se ubica en el Gran Área Metropolitana. Geográficamente se localiza entre 08°00’ y 11°15’ N y 82°30’ y 86°00 O. La latitud media se estima en 9.97º Norte y la longitud media en 84°19’ Oeste.

La cuenca del río Pejibaye (131.15Km^2) pertenece a la subvertiente Pacífico Sur y a su vez es una subcuenca del río General, el cual uno de los principales tributarios de la cuenca del río Grande de Térraba (Fig.1). La delimitación superficial de la cuenca corresponde al área drenada hasta la estación limnigráfica Pejibaye (No. 983110; 360 msnm) propiedad del Instituto Costarricense de Electricidad. El clima de la cuenca es típico del Pacífica costarricense con una estacionalidad muy marcada; la estación seca se extiende de diciembre a marzo (menos 60mm/mes), y la estación lluviosa durante el resto del año (100 a 420 mm/mes): En el mes de julio se presenta un descenso en la precipitación conocida como el “veranillo”. Los máximos mensuales de precitación se presentan en setiembre (348mm, CV:16%) y octubre (418 mm, CV:19%).

Las principales actividades económicas en la cuenca para el año 2005 eran el cultivo de café, la ganadería y en menor grado el cultivo de granos básicos. A partir de 1940 se inició el proceso de reemplazo del bosque por actividades agropecuarias en la cuenca, el cual se intensificó posiblemente a partir de la década del 50. La cobertura forestal para el año 1948 era de 98.1%, para el año 1961 se había reducido a un 31.7% y para el año 2005 quedaba solo el 3.8% del área original de bosque. Los bosques remanentes están ubicados en zonas de alta pendiente o en áreas dedicadas a la protección de las fuentes de agua (Fig. 2).

Figura 39: Cuenca del río Pejibaye. Costa Rica. Fuente Google Earth.

Los suelos de la cuenca son moderadamente profundos a profundos, poco permeables, con fertilidad de baja a alta (Fig. 3) (Acón y Asociados 1991). Aun cuando no se cuenta con datos sobre los niveles de deterioro de los suelos ocasionados por el huracán Mitch en 1998, la gira de campo realizada a la cuenca en junio del 2005 permite inferir que la misma ha alcanzado un nuevo estado de equilibrio hidrológico. El huracán causó daños a la infraestructura vial, destruyó viviendas y cultivos. Los testimonios recabados en la zona indican que el nivel del río Pejibaye aumentó significativamente; sin embargo no se cuenta con datos pues la estación medidora de caudales fue destruida por el evento. La cuenca del río Pejibaye provee de agua para consumo humano y agrícola a unas 870 familias de las comunidades de El Águila, Zapote, Concepción, Santa Fe, Veracruz de Pejibaye, La Sierra de Pejibaye, Las Mezas, Platanares, y el poblado de mayor tamaño Pejibaye.



1948 1961 2005. El color café indica la extensión del cultivo de café con sombra.

Figura 40: Cobertura forestal cuenca Pejibaye, 1948, 1961 y 2005. Fuente: Elaboración propia a partir de fotos aéreas (1948 y 1961); Sánchez, et. al., 2006.

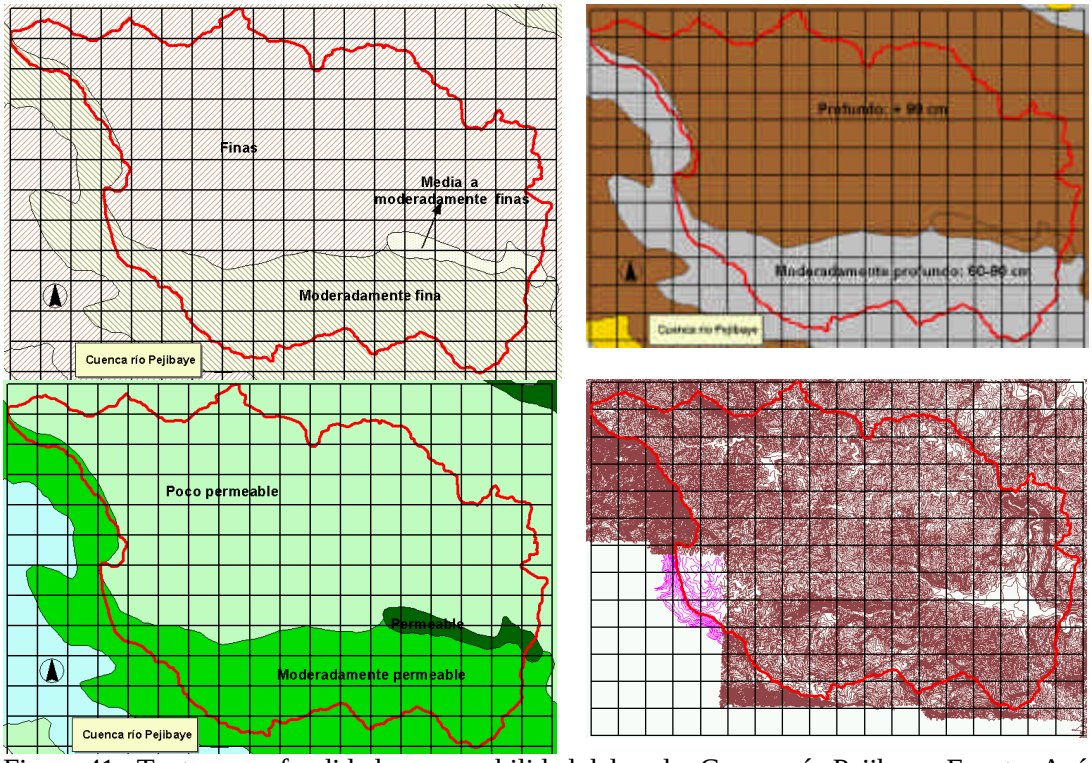


Figura 41 : Textura, profundidad y permeabilidad del suelo. Cuenca río Pejibaye. Fuente: Acón y Asociados, 1991.

Análisis de datos

Patrón de descarga anual

Para responder a la pregunta ¿Existe evidencia de cambios en la descarga anual de la estación Pejibaye en el periodo 1971-1995 se calculó la desviación (anomalía) anual con respecto a la media del periodo de estudio. El año hidrológico inicia en mayo y termina en abril del siguiente año. El control de calidad de los datos consistió en realizar un análisis de masa para los registros mensuales y evaluar visualmente los gráficos de las series diarias para cada año. Una vez aceptados los datos se procedió con la evaluación de tendencia para las décadas del 70, 80 y 90. Posteriormente cada año se clasificó como Niño ó Niña utilizando los datos y criterios de El Centro de Predicción Climática del Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos de América. Un año fue declarado como Niña ó Niño cuando la desviación de la temperatura superficial del océano Pacífico (SST) de la Zona El Niño 3.4 supera ±0.5C durante 5 periodos sucesivos de tres meses (Climate Prediction Center, 2007). Finalmente se calcularon estadísticos descriptivos por episodio del ENOS y se realizó una prueba de Prueba de Kruskal-Wallis para probar por diferencias en las medianas de cada periodo. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa XLStats (Carr, 2007).

Descarga máxima en 24, 48 y 72 horas e instantánea

Para responder a la pregunta ¿Existe evidencia de cambios en la magnitud de las descargas máximas en la cuenca? se analizaron eventos máximos en 24, 48 y 72 hr e instantáneos para el

periodo 1971-1995. La descarga máxima anual en 24 horas corresponde a la descarga media diaria máxima registrada en la estación en cada uno de los años del registro (25 valores). La descarga máxima en 48 horas corresponde a los dos días consecutivos que registraron la máxima descarga media diaria en el año y la descarga máxima en 72 hr corresponde a los tres días consecutivos que registraron la máxima descarga media diaria del año. La descarga máxima instantánea corresponde al máximo nivel de agua alcanzado por el agua en el sitio de aforo. Para facilitar la comparación de las descargar máximas con los datos de precipitación dichos valores se convirtieron a mm. Los datos utilizados en el presente trabajo fueron suministrados por el departamento de Hidrología del Instituto Costarricense de Electricidad. Cada evento máximo se clasificó por episodio de ENOS (Niño, Niña) utilizando el mismo criterio del punto anterior. Se realizaron pruebas de correlación y regresión para analizar las posibles relaciones entre la magnitud de las descargas máximas y los índices IOS (Índice de Oscilar Sur) y ONI (Índice Oceánico, Niño 3.4); todas las pruebas se realizaron con un nivel de significancia de 5% ($P< 0.05$). Los registros históricos de IOS y ONI se obtuvieron de las bases de datos disponibles en la Oficina de Meteorología del gobierno de Australia (Australian Goverment Bureau of Meteorology, 2007) y NOAA (Climate Prediction Center, 2007).

Para determinar si existía algún cambio en la frecuencia de los periodos de recurrencia de las descargas máximas se ajustaron 5 distribuciones de frecuencia de valor extremo (Log Normal de 3 parámetros, Wakeby, Log Person tipo III, Valor Generalizado Extremo y no paramétrica) utilizando el programa CFA3 (Pilon and Harvy, 2001; Ponce,1989). El ajuste de distribuciones de frecuencia teóricas a datos extremos permite estudiar su comportamiento y realizar estimaciones de periodos de retorno para eventos de diferentes magnitudes. El tiempo transcurrido entre dos eventos máximos sucesivos que exceden un valor determinado de lluvia es una variable aleatoria denominada periodo de retorno (Tr) o intervalo de recurrencia del evento. Se utilizó una criterio visual para seleccionar la distribución que mejor se ajustaba a los datos. Una vez seleccionada las distribución se calculó la lluvia máxima en 24hr esperada para eventos con una recurrencia de 2,5, 10, 100 y 200 años.

Finalmente se analizaron los resultados anteriores en el contexto de los cambios en uso-cobertura de la cuenca observados en el periodo de estudio. Para esto se elaboran mapas de uso-cobertura para los años 1948, 1961 y 2005.

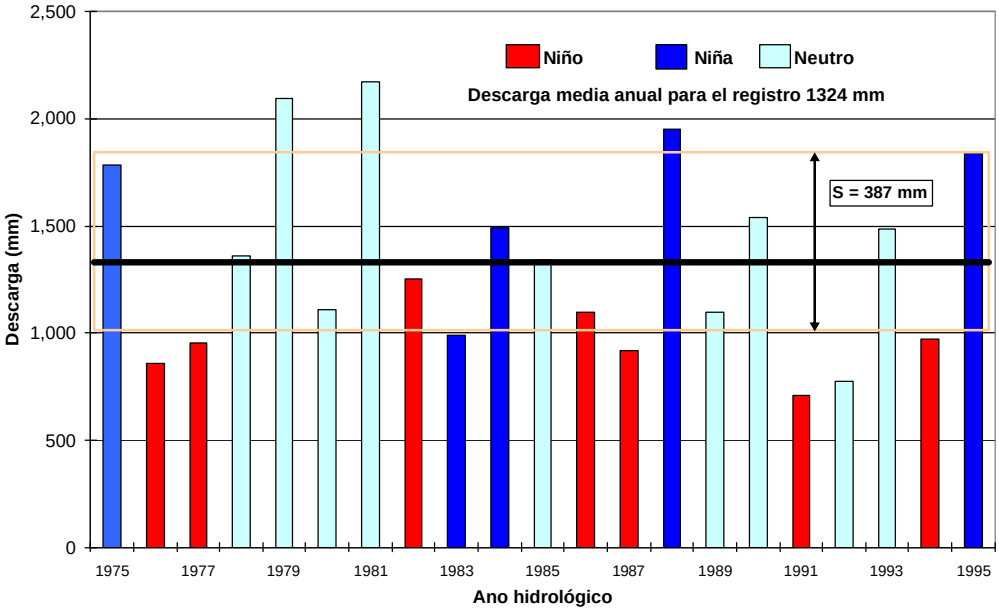
Resultados

1. Series anuales

La estación Pejibaye (No. 983110) estaba ubicada en el río del mismo nombre a una elevación de 360 msnm. Este río es un afluente del río General que a su vez drena en el río Grande de Térraba. Geográficamente se ubica en la zona Pacífico Sur de Costa Rica. La estación Pejibaye cuenta con registros de descarga para el periodo mayo 1975-junio1996; el huracán César destruyó la estación en julio de 1996 y no fue reemplazada por el Instituto Costarricense de Electricidad.

El análisis de masa para la descarga mensual indicó que los datos presentan una anomalía para el periodo 1975-1974 y por esta razón los mismos no fueron utilizados en el estudio. La descarga media anual de la cuenca para el periodo de análisis (1975-95) fue de 1324 mm, con un coeficiente de variación de 33%, con un mínimo de 711 mm en 1991 y un máximo de 2174

mm en 1981 (Fig. 4). No se detectó ninguna diferencia significativa entre la descarga mediana anual para las décadas de los años 70s, 80s y 90s (Prueba de Kruskal-Wallis P=0.77), Fig. 4).



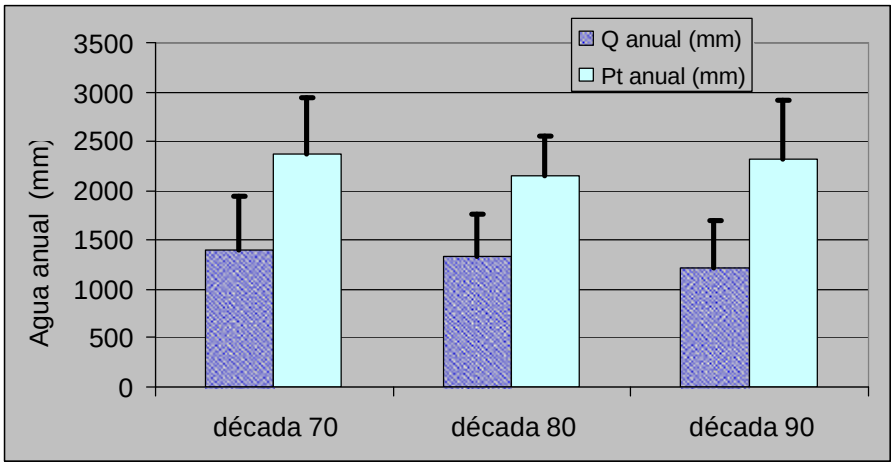
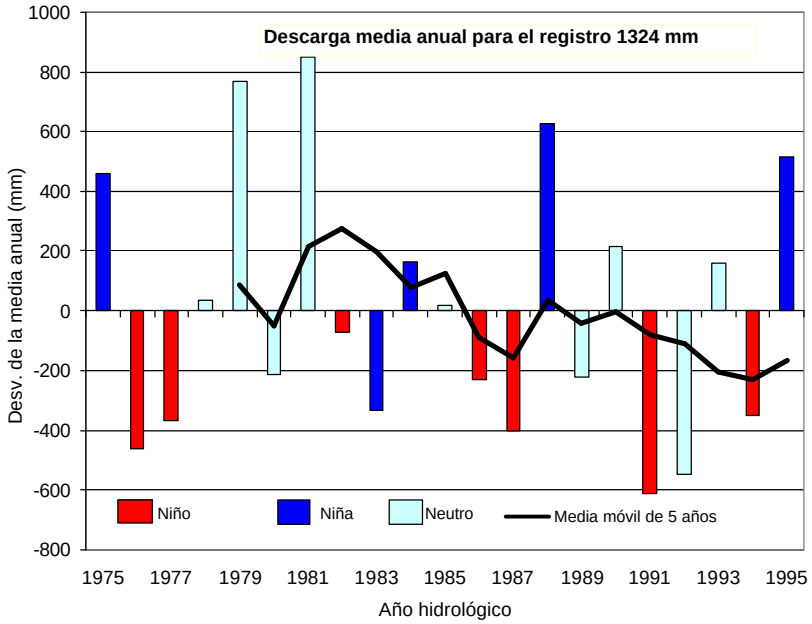


Figura 42 : Comportamiento anual y decadal de la descarga (mm) en la estación Pejibaye (No. 983110, 1975-1995), cuenca del río Pejibaye, Pacífico Sur, Costa Rica.

Durante los episodios de Niño la descarga media fue 967 mm; en tanto que durante los años Niña el valor ascendió a 1612mm; la descarga media de los años neutros fue muy similar a la descarga media del registro; 1406 Vs 1324 mm, respectivamente (Cuadro 1). La media móvil de 5 años indica que a partir de la década de 1980 se registró una tendencia a la reducción en la descarga anual, acentuada por la influencia de los años Niño (Fig. 5). La tendencia en las desviaciones de la media es negativa para los años Niño y positiva para los años Nina; los años Neutros presentan tanto desviaciones negativas como positivas (Fig. 5).El análisis de intervalos de confianza utilizando 4 clases de cinco años cada una indica un patrón similar (Fig. 6).

Cuadro 5: Estación Pejibaye No. 983110, estadísticos para el periodo 1975-1995.

ENOS	Q (mm)	S (mm)	CV (%)	N
media Niño	967	117.2	17.8	7
Media Niña	1611	386.8	24.0	5
Media Neutro	1405	455.0	24.0	9
Media registro	1324	439.4	32.4	21



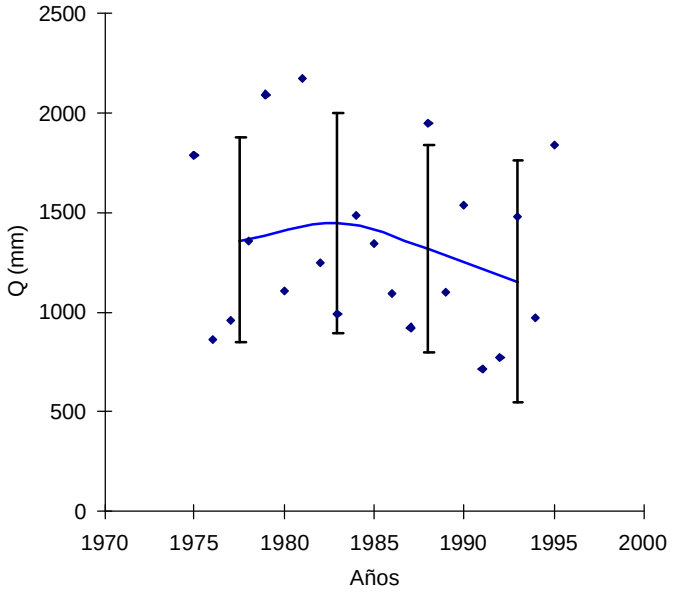


Figura 43: Desviaciones de la media e intervalos de confianza de 95% para grupos de 5 años. Estación Pejibaye 983110 (1975-1995). Basado en datos de ICE.

Los episodios de ENOS tienen una marcada influencia en la descarga media anual (Fig. 6); durante los años Niña la escorrentía total anual es mayor comparada con años Niño ó Neutros (Mann-Whitney, P=0.01). La diferencia en descarga media entre años Niña y Niño fue de 641 mm en tanto que para años neutros fue de 170 mm. De los siete años Niño, el 100% presenta desviaciones negativas; lo cual representa un 64% de todas las desviaciones negativas del registro. Por otro lado, durante los anos Niña, el patrón se invierte ya que el 80% de los años corresponde a desviaciones positivas. Para los años neutros el 33% corresponde a desviaciones negativas. La prueba LSD de Fisher (alfa 0.05) detectó como diferentes a las comparaciones Niña-Niño y Neutro-Niño.

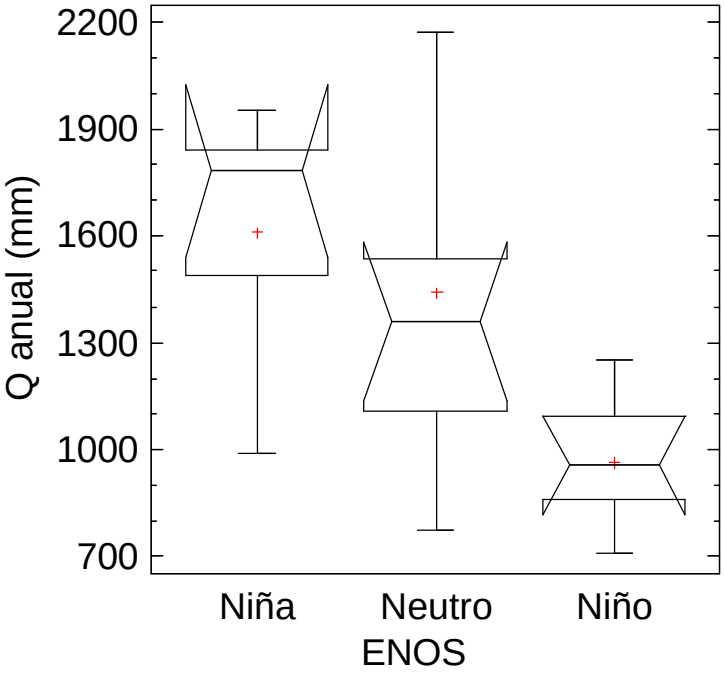


Figura 44: Efecto de ENOS en la descarga media de la estación Pejibaye 983110 (1975-1995). Basado en datos de ICE.

Coeficientes de descarga /precipitación (Q/P)

Es patrón de escurrimiento anual de la cuenca sigue la tendencia de la precipitación; en general, años más lluviosos generan mayor escurrimiento y años más secos menos escurrimiento (Fig. 5). El coeficiente medio anual de descarga de la cuenca durante los 21 años del registro (1975-1995) fue de 61.5%; detectándose una diferencia significativa (Kruskal-Wallis P=0.04) entre la razón de escurrimiento (Q/P) de los diferentes episodios del ENOS. Durante los años de la Niña, el 63% de la precipitación se convirtió en promedio en descarga, en tanto que en años de el Niño dicho valor descendió a un 54%. La prueba LSD de Fisher (alfa 0.05) detectó como diferente a la comparación Neutro-Niño.

La evaporación media registrada en la estación Bolivia para el mismo periodo fue de 1294 mm y su valor anual no parece ser influenciada por el ENOS pues durante los episodios de El

Niño y la Niña el valor se redujo en tan solo 3.5% y 1%, respectivamente. El balance de masa de la cuenca (Q_Pejibaye–P_Bolivia) indica que en promedio la evapotranspiración fue de 786 mm (CV=16%) en el periodo 1975-95, así como durante los años Niño (785 mm), reduciéndose en los años Neutros (718mm) y aumentando en los años Niña (909mm); sin embargo la prueba LSD de Fisher (P<0.05) solo detectó como diferente a la comparación años Niña versus años Neutro (Fig.7). Esto es consistente con el hecho de que la cuenca no sufrió cambios significativos en su uso-cobertura durante dicho periodo; aunque si se observó un reemplazo de pastos por café en la sección norte y oeste de la cuenca a partir de la década del 80.

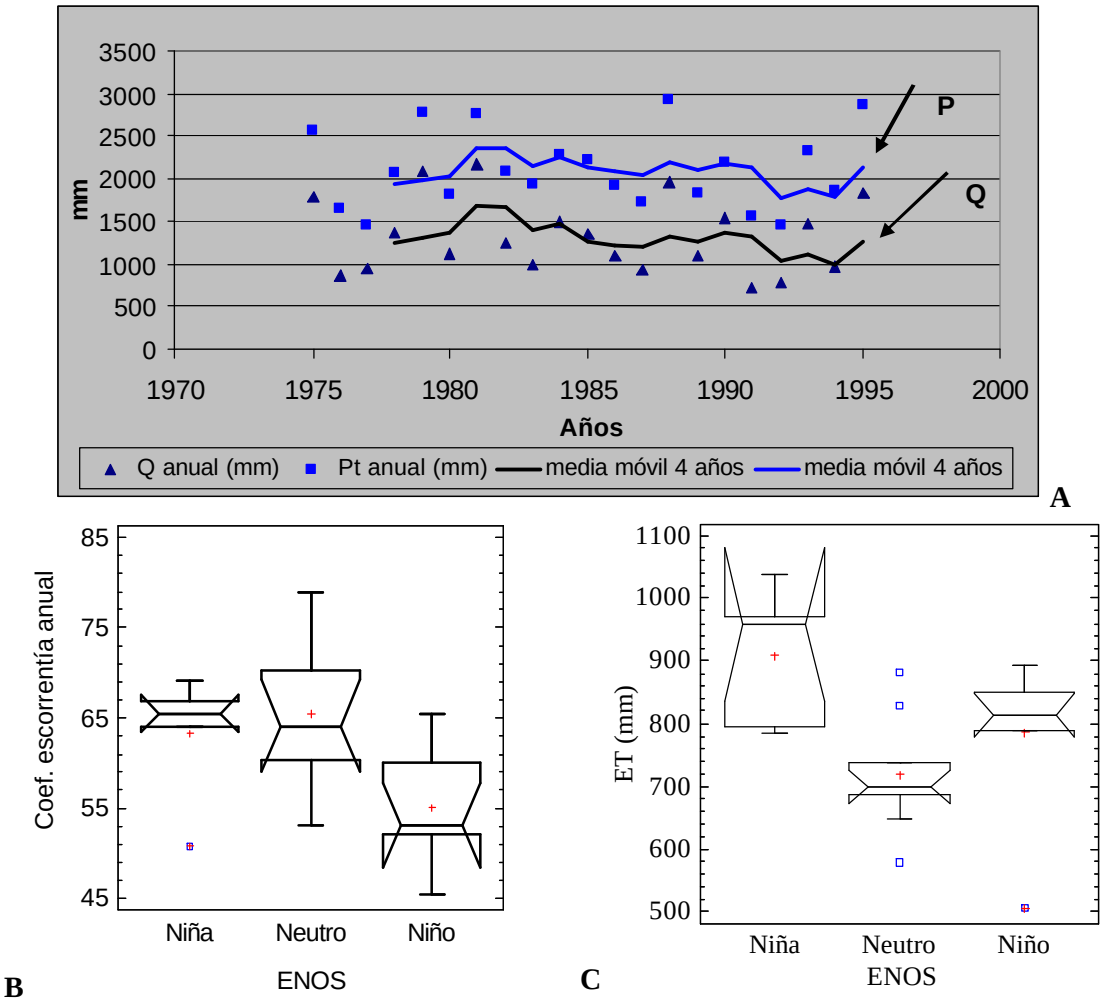


Figura 45: A. Relación precipitación anual (Estación Bolivia) y descarga anual (estación Pejibaye), cuenca del río Pejibaye y efecto de ENOS en los coeficientes de escorrentía anual (B) y la evapotranspiración (C). Periodo 1975-1995. Fuente: Basado en datos de ICE. Las líneas indican medias móviles de 4 años.

La figura 8 muestra la relación entre la precipitación y la descarga anual de la cuenca expresadas como desviaciones de la media para el periodo de estudio. Un 92% de la variabilidad en las desviaciones en la descarga anual se deben a la variación en las desviaciones de la media en precipitación. O sea, años con precipitaciones superiores a la media también generan descargas superiores a la media y viceversa. Los datos de precipitación anual de la estación Bolivia indican que entre 1969 y 2005 se registraron 12 años Niño, de los cuales el 92% presentaron desviaciones negativas; lo cual representa un 58% de todas las desviaciones negativas del registro. Por otro lado, durante los años Niña, el patrón se invierte ya que el 83% de los años corresponden a desviaciones positivas. Para los años neutros el 67% corresponde a desviaciones negativas (Fallas y Valverde, 2007).

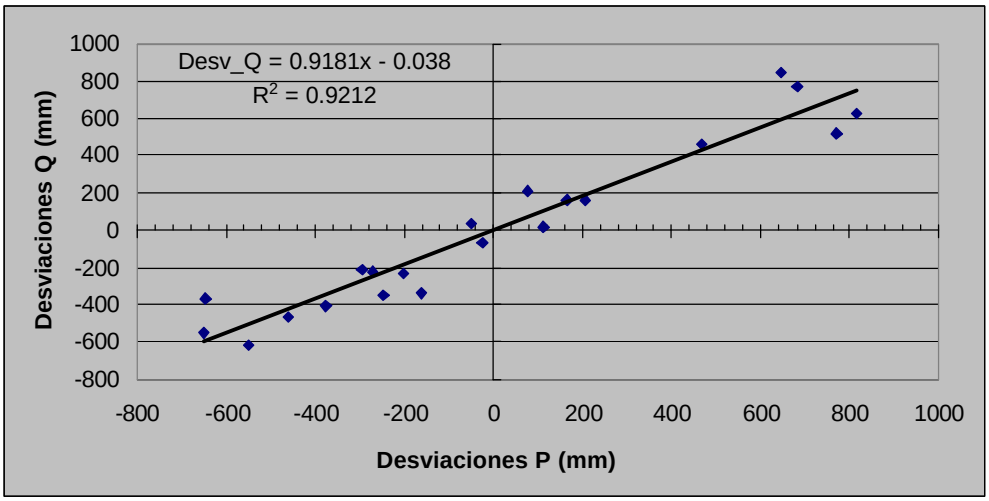


Figura 46: Desviaciones de la media anual de la precipitación y la descarga. Estación Pejibaye, 1975-1995. Fuente: basado en datos de ICE.

Descargas máximas medias diarias en 24, 48 y 72 hr y periodos de retorno

El cuadro 2 presenta los estadísticos descriptivos para las series máximas anuales en 24, 48 y 72hr de la estación Pejibaye durante el periodo 1975-1995. De los cinco valores máximos de la serie cuatro corresponden a años neutros y 1 a Niña. El valor máximo en 24hr de la serie se registró el 14 de setiembre de 1993 (Neutro) con 140 mm; seguido por 130 mm el 22 de octubre de 1988 (Niña) (Fig. 9). El primer evento está asociado a la Depresión Tropical Gert, la cual estuvo a 140 Km de la costa Caribe de Costa Rica el 15 de setiembre de 1993 y el segundo al huracán Juana (Cat. 3) que estuvo a 212Km de la costa Caribe de Costa Rica el 22 de octubre de 1988. Los tres eventos máximos en 48 y 72 horas corresponden a 1993 (9 a 11 oct, Neutro), 1979 (15 a 17 diciembre, Neutro) y 1998 (1-3 octubre, Niña). Se registraron 5 eventos superiores a 58 mm (percentil 75); de los cuales uno corresponde a Niña y cuatro a neutros. Para el percentil 25 (menos 20.2 mm) se registraron 5 eventos (3 Niños, 1 Niña y 1 Neutro). El 81% de los eventos máximos se presentaron en los meses de setiembre (3), octubre (10) y noviembre (3), los cuales coinciden con los meses más lluviosos en la cuenca, a excepción de noviembre (Fig. 10).

Cuadro 6: Estadísticos para serie de eventos de descarga máxima anual en 24, 48 y 72 horas. Estación Pejibaye (Periodo 1975-1995). Fuente: basado en datos de ICE.

Estadístico	Descarga media máxima anual en 24 hr (mm)	Descarga media máxima anual en 24 hr (mm)	Descarga media máxima anual en 24 hr (mm)
Min	13.0	23.0	33.0
Max	140.0	263.0	286.0
Percentil 10	14.12	25.6	37.0
Percentil 25	20.2	38.5	51.5
Percentil 50	38.0	51.0	72.0
Percentil 75	58.0	99.5	120.0
Percentil 90	129.4	212.2	266.6
N	21	21	21

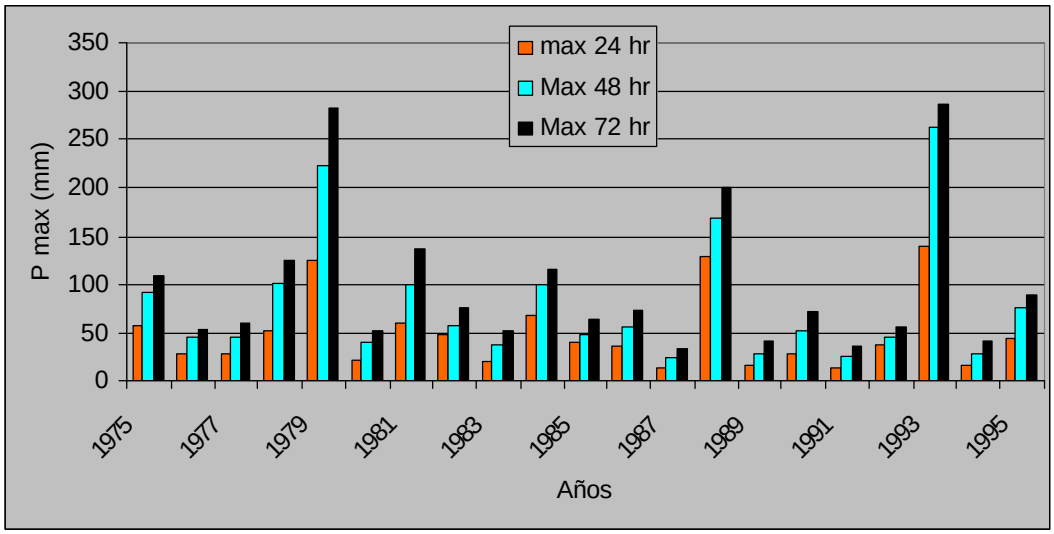
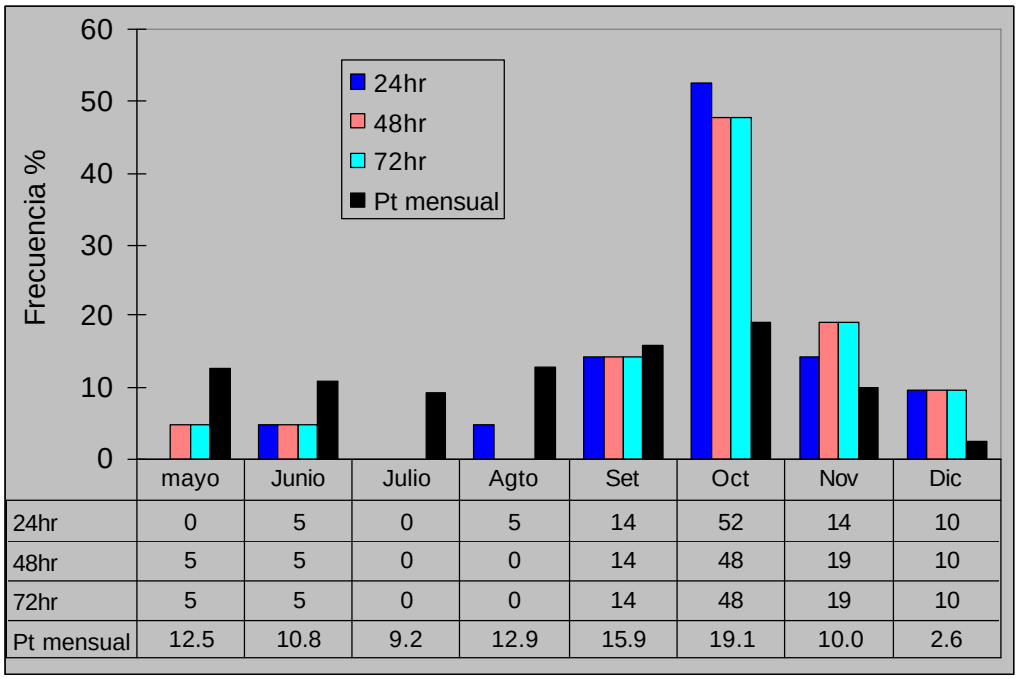


Figura 47: Descarga media máxima anual en 24 horas por episodios del ENOS. Pejibaye (No. 1975-1995). Fuente: Basados en datos de ICE.

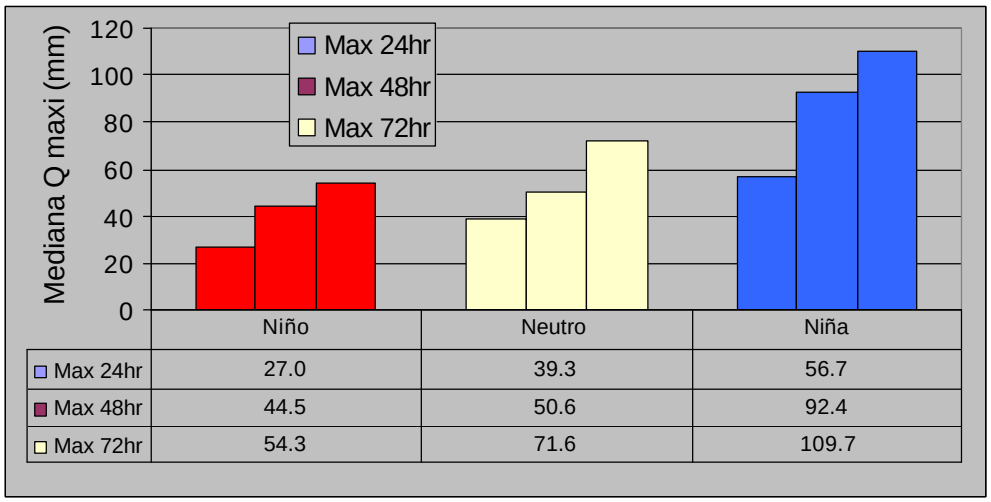


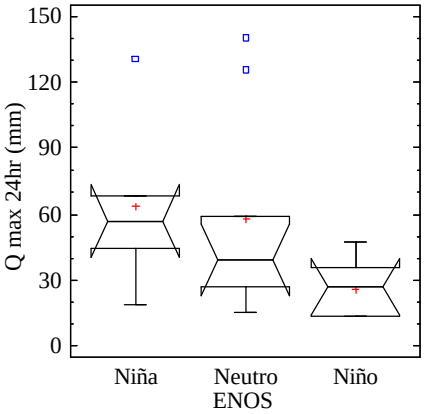
	mayo	Junio	Julio	Agto	Set	Oct	Nov	Dic
24hr	0	5	0	5	14	52	14	10
48hr	5	5	0	0	14	48	19	10
72hr	5	5	0	0	14	48	19	10
Pt mensual	12.5	10.8	9.2	12.9	15.9	19.1	10.0	2.6

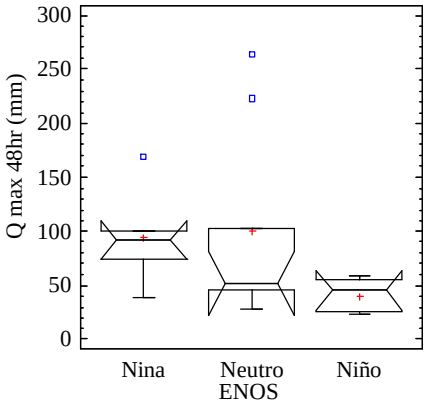
Figura 48: Frecuencia (%) de eventos máximos en 24, 48 y 72hr en la estación Pejibaye (1975-1995) y su relación con la precipitación mensual (1969-2005). Fuente: basado en datos de ICE.

Los años Niña tienden a generar eventos con descargas máximas mayores en 24, 48 y 72hr que los años Niño y neutro; sin embargo debido al tamaño de la muestra y a la alta variabilidad del set de datos las mismas no fueron detectadas como estadísticamente significativas (Kruskall-Wallis, P>0.059), (Fig. 11).

La descargas máximas en 24, 48 y 72 hr muestran una correlación positiva con el índice Oceánico El Niño (ONI) de los meses de agosto, setiembre y octubre (Fig. 11). La tendencia indica que al intensificarse la fase calida de ENOS se reduce la cantidad de precipitación (Fallas y Valverde, 2007) y por tanto también se reduce el valor de las descargas máximas. La relación es menos consistente para años neutros y Niñas (como lo confirma la prueba de Kruskall-Wallis); sin embargo la tendencia indica que existe una mayor probabilidad de que durante años Niña se generen descargas mayores (Fig.12).







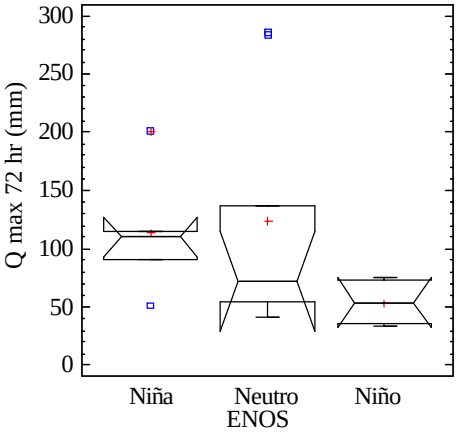


Figura 49: Efecto de ENOS en mediana de las descargas máximas en 24, 48 y 72 horas en la cuenca del río Pejibaye (1975-1995). Fuente: Basados en datos de ICE.

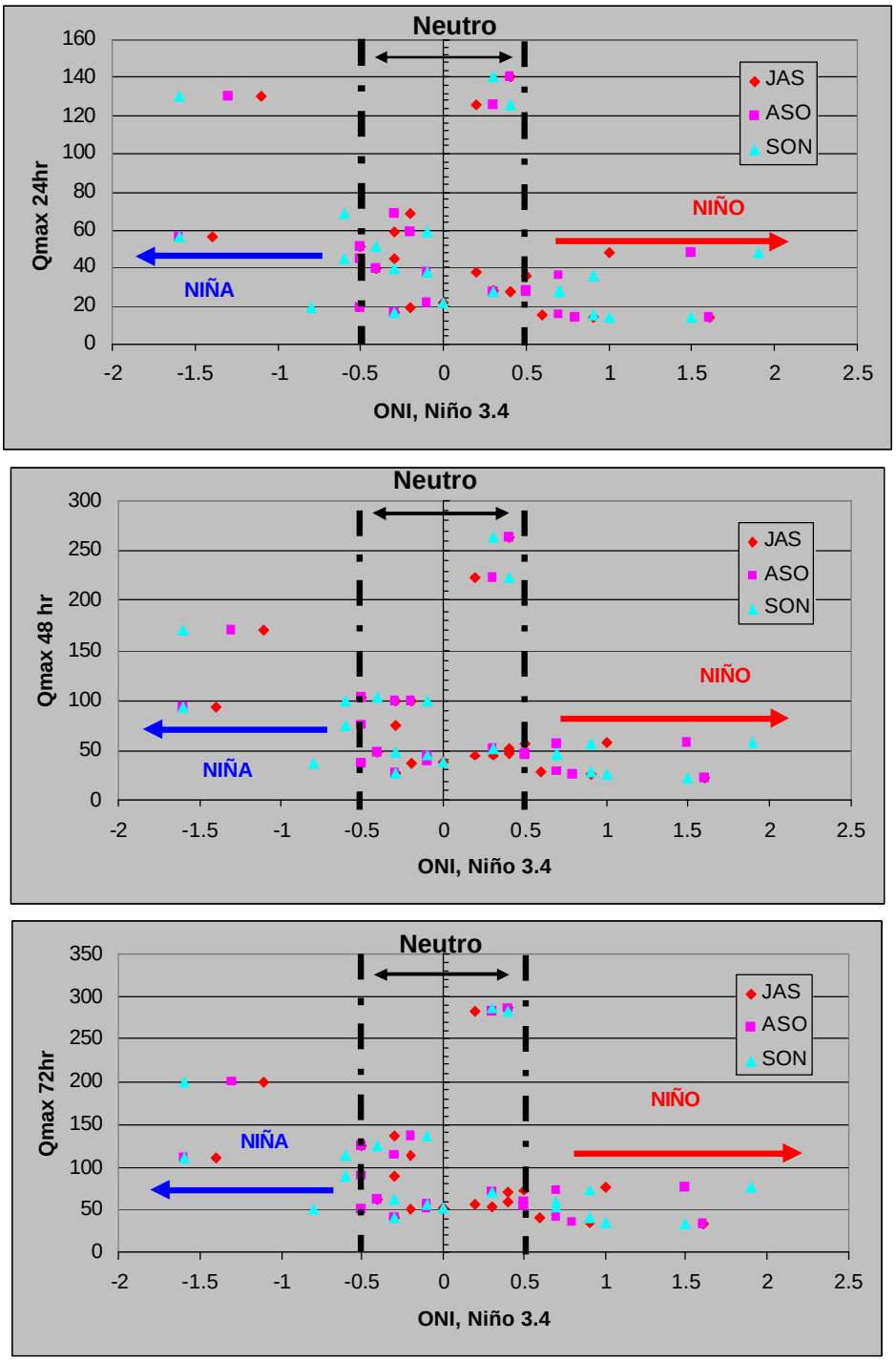


Figura 50 : Relación entre índice ONI (Niño 3.4) y descarga máxima en 24 horas para la cuenca del río Pejibaye (1975-1995). J: Julio, A: Agosto, S: Setiembre, O: Octubre, N: Noviembre. Fuente: Elaborado a partir de datos de ICE y de Climate Prediction Center (2007).

Periodos de retorno para descargas en 24, 48 y 72hr

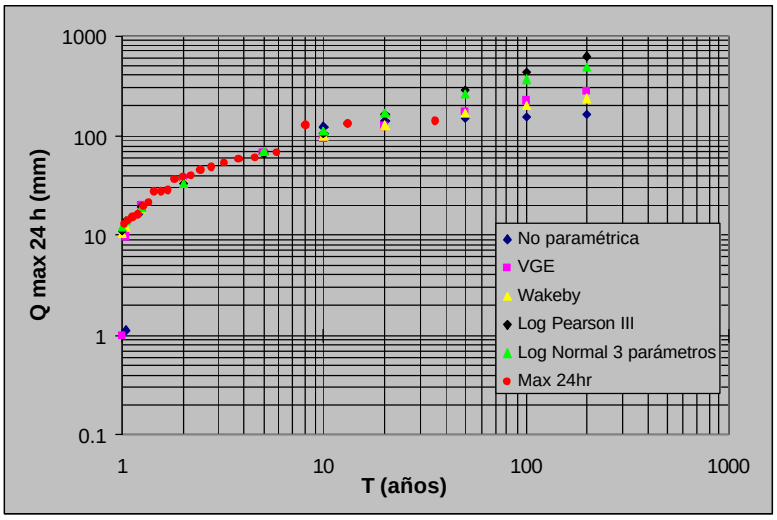
El programa CFA (Pilon and Harvy, 2001) no detectó valores extremos para las series anuales de máximos en 24, 48 y 72 horas y las pruebas realizadas indican que los datos cumplen con los supuestos de independencia, aleatoriedad y homogeneidad. A partir del análisis visual del grado de ajuste entre los valores observados y el ajuste de cada una de las distribuciones de frecuencia de valor extremo se eligió la distribución de Wakeby como la que mejor se ajustaba a los datos. El cuadro 3 y la figura 13 muestran los valores de descarga máxima anual en 24, 48 y 72 horas esperados según la distribución de frecuencia de Wakeby. Para la descarga máxima en 24hr los dos eventos mayores corresponden a la Depresión Topical Gert (1993) y huracán Juana (1988). El patrón es similar para las máximas en 48 y 72 horas, con la diferencia de que el segundo valor más alto corresponde al año 1979 (Fig. 14) y no está asociado directamente a ningún ciclón tropical; aunque entre el 21 y el 23 octubre cuando se registró la mayor precipitación en Bolivia (134mm, 176mm y 84mm, respectivamente) la depresión Tropical Ignacio se encontraba a 1300Km (Pacífico Oriental) hacia el noroeste de la estación Bolivia.

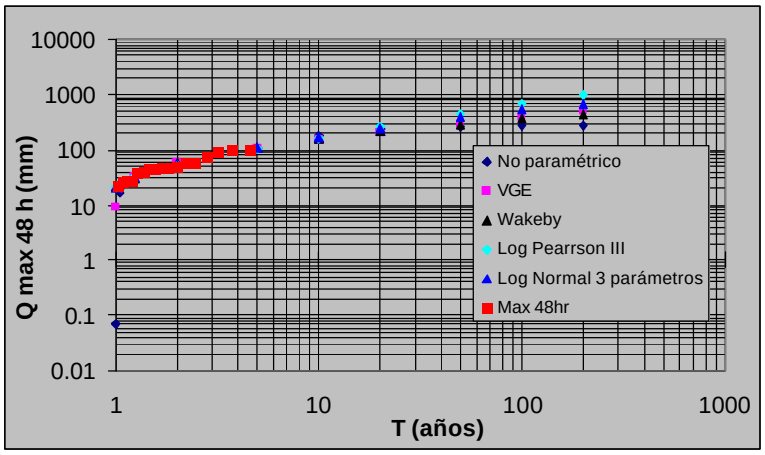
El 81% de los años presentaron descargas máximas en 24hr con periodos de retorno iguales o inferiores a 10 años (Q <98.8mm). A partir de la serie de máximos anuales en 24hr en la cuenca del río Pejibaye se espera una descarga máxima diaria del orden de 99 mm en promedio al menos una vez cada 10 años. Para un periodo de retorno de 50 años la descarga esperada en 24hr sería de 202mm. La lluvia máxima en 24hr registrada en 1993 (332 mm, Depresión Tropical Gert) con un periodo de retorno superior a los 150 años ocasionó la descarga máxima registrada en la cuenca; sin embargo el periodo de retorno estimado para dicho evento fue inferior a 40 años. El evento de 1996 (364 mm de lluvia, Huracán César) destruyó la estación; lo que indica que generó un caudal muy superior al evento de 1993.

La grafica de periodos de retorno en función de los años indica que durante 1975 y 1995 so se observó ningún patrón en cuanto a descenso/ascenso en la frecuencia de avenidas máximas en 24, 48 y 72 horas (Fig. 14). Sobresalen de la serie las descargas en 24, 48 y 72 horas del año 1993, las cuales están asociadas al efecto indirecto de la depresión Tropical Gert. El huracán Juana (1988) con una lluvia en 24hr de 253 mm ocasionó un incremento en el periodo de retorno de la descarga en 24hr; sin embargo el huracán ejerció una menor influencia en las descargas máximas en 48 y 72 horas.

Cuadro 7: Descarga máxima anual esperada en 24 horas para periodos de retorno entre 1 y 200 años. Estación Pejibaye (Periodo 1975-1995).

Tr (años)	Probabilidad de excedencia	Descarga máxima (mm) Según distribución de Wakeby		
		24hr	48hr	72hr
1.003	0.997	10.6	21.3	31.0
1.05	0.952	12.2	23.7	33.6
1.25	0.8	18.4	31.6	43.3
2	0.5	35.7	55.3	71.3
5	0.2	70.8	109.0	133.0
10	0.1	98.8	156.0	188.0
20	0.05	128.0	210.0	250.0
50	0.02	169.0	295.0	344.0
100	0.01	202.0	370.0	428.0
200	0.005	236.0	456.0	522.0





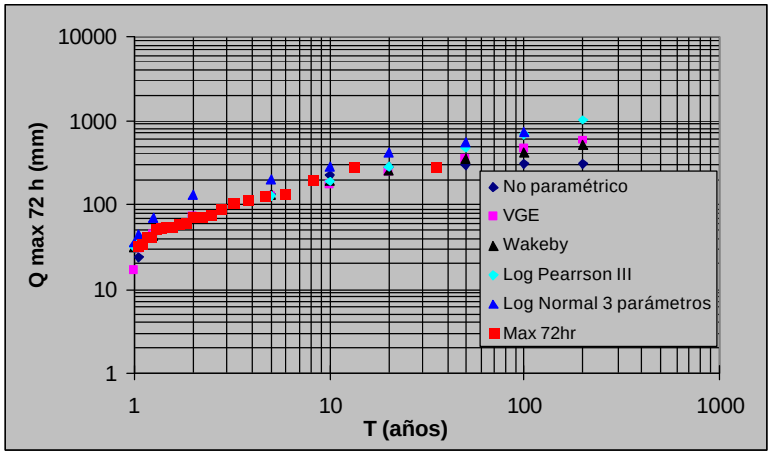


Figura 51:Distribuciones de frecuencia para datos de descarga media máxima anual en 24 horas. Estación Pejibaye (Periodo 1975-1995). Fuente: basado en datos de ICE.

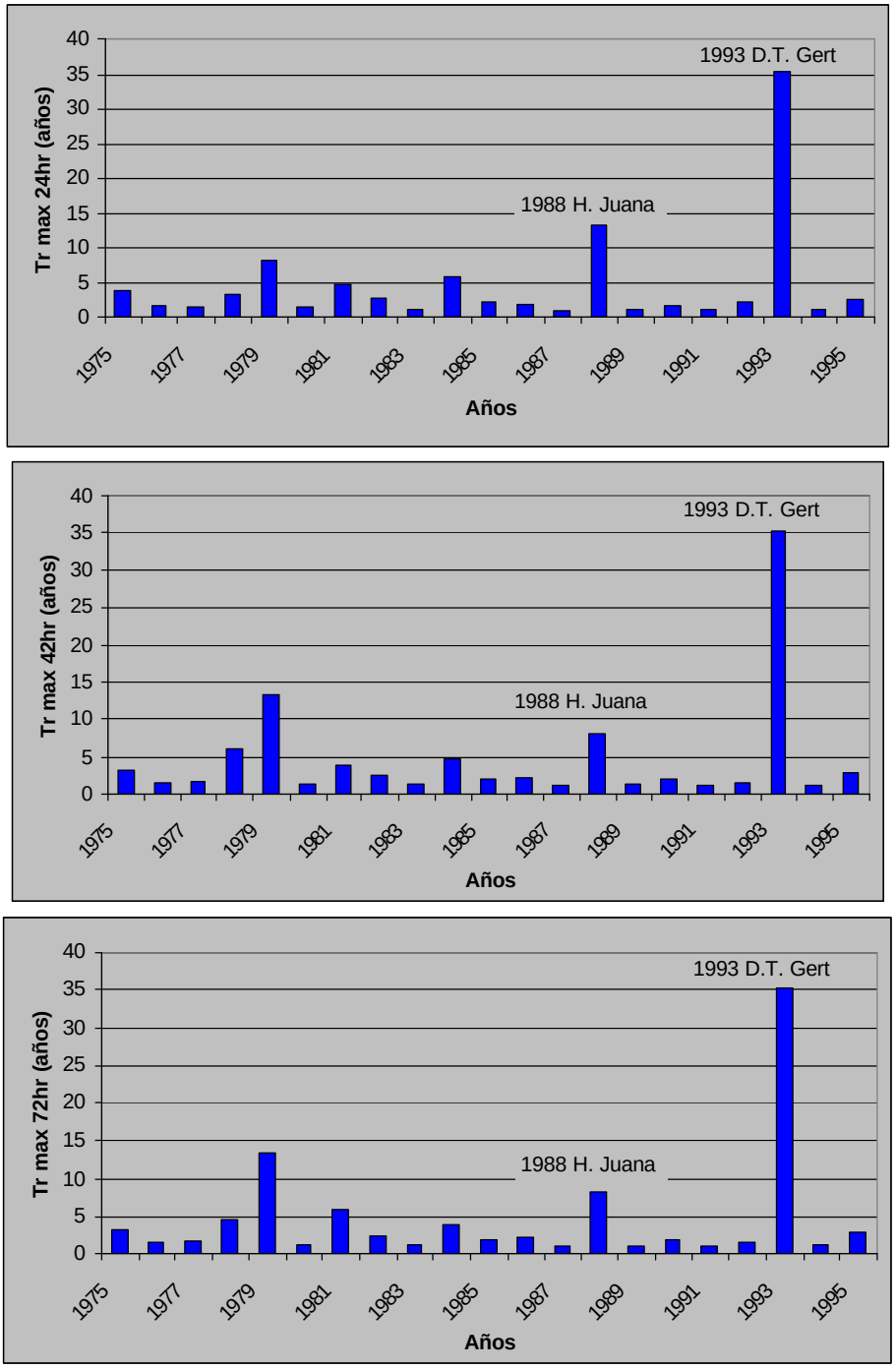


Figura 52: Periodo de retorno esperado para descargas máximas anuales en 24, 48 y 72 horas para la estación Pejibaye (No.98011, 1975-2005), cuenca río Pejibaye. Costa Rica..

La distribución de frecuencia de la descarga máxima en 24hr por eventos del ENOS y para periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años indican que ni la fase fría ni la cálida parecen ejercer una influencia significativa (Chi-cuadrado; P>0.11) (Fig. 15). El 48% de los años del registro tienen periodos de retorno inferiores a 2 años y de estos el 50% corresponden a años Niño; los cuales representan el 33% del total de años de la serie. La ausencia de significancia se debe posiblemente al reducido tamaño de la muestra. En general, los años Niño tienden a caracterizarse por eventos máximos en 24hr con períodos de retorno iguales o inferiores a 2 años (máximo de 36 mm) en tanto que los años Niña y neutros tienen eventos con periodos de retorno entre 2 y 10 años (36 a 98.8 mm por día). Los máximos para 48 y 72hr muestran un comportamiento similar al de 24hr.

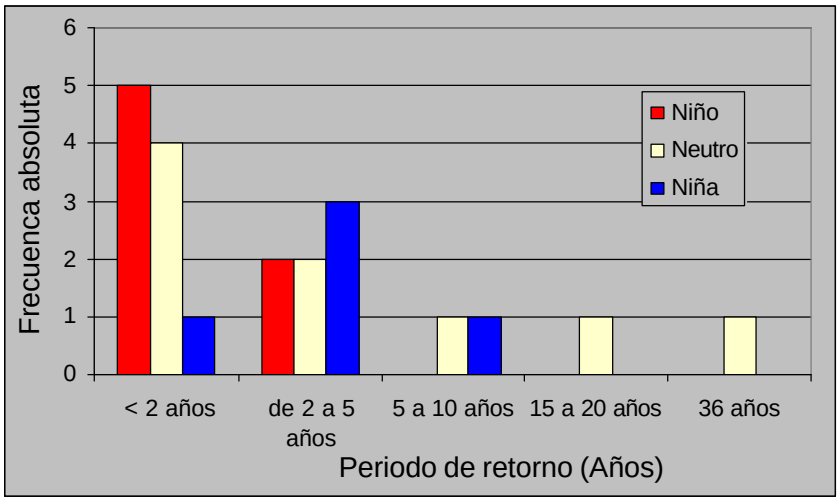


Figura 53: Frecuencia de eventos máximos en 24hr para períodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años por episodio de ENOS. Estación Pejibaye (No. 983110, 1975-2005), cuenca río Pejibaye. Costa Rica..

Niveles máximos instantáneos

El cuadro 4 presenta los estadísticos descriptivos para los niveles de agua máximos instantáneos alcanzados por el río en la estación Pejibaye entre 1975 y 1995. Los niveles sobre tres metros, excluido el registro extremo asociado a la Depresión Tropical Gert y el dato del Huracán Juana, se registraron el 30 de setiembre de 1982 (3.14m, Niño), el 23 de octubre de 1979 (3.05m, Neutro) y el 2 de setiembre de 1971 (3.02m, Niña). Se registraron 6 eventos superiores a 2.58 m (percentil 75); de los cuales dos corresponden a Niñas, tres a neutros y uno a Niño; los eventos se repartieron tres en la década del 70, dos en la década del 80 y uno en la década del 90. Si se excluye el valor extremo, la serie muestra una ligera tendencia al descenso en los niveles máximos instantáneos en la década del 80 y una ligera tendencia a aumentar entre 1990 y 1995 (Fig.16), lo cual coincide con una reducción en la precipitación en la cuenca. La figura 17 muestra que la relación entre el nivel máximo de agua y la precipitación que la originó (día + día anterior) no cambió significativamente entre 1975 y 1995; aunque muestran una gran variabilidad para un mismo nivel de precipitación.

Cuadro 8: Estadísticos descarga máxima instantánea (m). Estación Pejibaye (Periodo 1975-1995). Fuente: basado en datos de ICE.

Estadístico	Descarga máxima instantánea (m)*
Min	1.54
Max	3.34
Percentil 10	1.60
Percentil 25	1.86
Percentil 50	2.10
Percentil 75	2.58
Percentil 90	3.10
N	21

* Excluye los valores de 1993 (5.46 m, ocasionado por D.T. Gert) por considerarse como un valor extremo para la serie y el nivel del año 1988 (Huracán Juana, dato perdido).

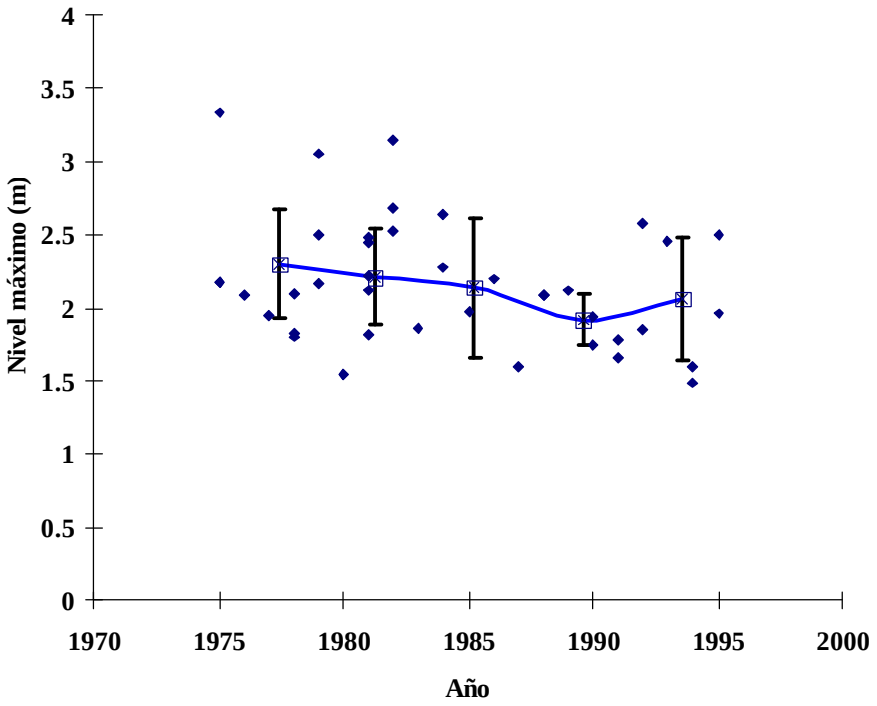


Figura 54: Nivel máximo instantáneo alcanzado por el río Pejibaye (estación No No.98011, 1975-2005), Pacífico Sur, Costa Rica. Líneas verticales indican intervalo de confianza al 95%. No se considera valor del año 1993 (5.46 m, ocasionado por D.T. Gert) y 1998 (Huracán Juana, dato perdido).

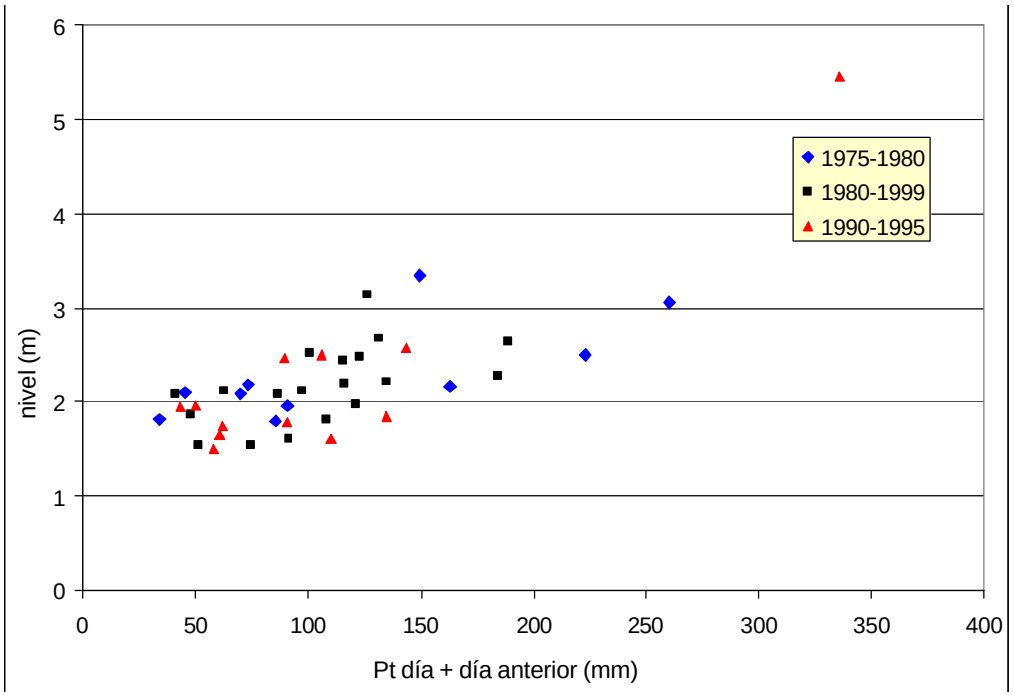


Figura 55: Relación entre nivel máximo instantáneo (m) alcanzado por el río Pejibaye y la precipitación (mm) del día que registró el evento y del día anterior. No incluye valor de nivel ocasionado por Huracán Juana en 1988 (dato perdido).

Discusión

Cambio climático, ENOS, descargas máximas y uso-cobertura de la tierra

Existe consenso en la comunidad científica de que en el último siglo y especialmente en los últimos 20 años la temperatura media de la superficie terrestre ha incrementado (Adger N, et al. 2007; Alexander, L. V., et al. 2006; Alley, et al. 2007) y con ella se plantea la hipótesis de un incremento en la frecuencia y/o magnitud de las lluvias extremas (Adame y Estrada, 2003; Aguilar, et. al., 2005; Alfaro, 2007; Alexander, et al. 2006; Frich, et.al., 2002; Instituto Meteorológico Nacional, 2005; Peterson et. al., 2003) y por ende se esperaría también un incremento en las avenidas extrema asociadas a dichos incrementos en precipitación. Sin embargo los datos que sustentan estas hipótesis son escasos e inconclusos, especialmente en los trópicos (Aguilar,et.al, 2005; Fallas y Valverde, 2007; Frich, et. al., 2002; Tank, et. al.2006; Peterson et. al.,2003).

No se encontró ningún estudio para Costa Rica que relacione la frecuencia/magnitud de descargas máximas con lluvias extremas o cambios en el uso-cobertura de la cuenca; aunque sí existen estudios sobre lluvias máximas/extremas (Fallas y Valverde, 2007; Retana y Villalobos, 2001).

El comportamiento de la descarga anual en la cuenca de Pejibaye muestra una variabilidad interanual (CV:39%) esperado para toda cuenca y una estacionalidad marcada en respuesta a la distribución mensual de la lluvia en la cuenca. La década del 80 fue más seca comparada con las décadas del 70 (+225mm) y 90 (+167mm); aun cuando no se observó ningún predominio de las fases del ENOS (50% Niñas en el 70, 30% Niñas en 80 y 30% Niñas en el 90). Sin embargo la relación entre nivel máximo de agua y precipitación día + día anterior indica que no existe un cambio evidente en el patrón a través del tiempo; esto puede indicar que no hubo un cambio en los coeficientes de escorrentía de la cuenca.

No existen mapa detallados de uso-cobertura para la cuenca entre 1961 y 2000; sin embargo a partir de los datos reportados para los distritos de Pejibaye y Platanares en los Censos Agropecuarios de 1973 y 1984 y los datos de bosque de 1961 y 2000 se estimó el porcentaje de cobertura forestal de la cuenca para el periodo de análisis (Fig.18). Entre 1970 y el 2000 se estima que la cuenca perdió un 17% de su cobertura forestal.

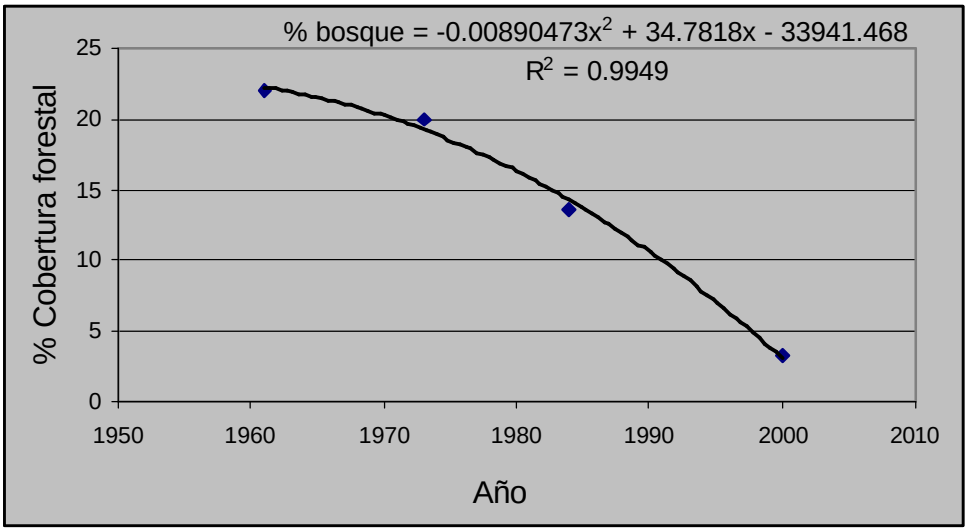


Figura 56: Estimación de cobertura forestal para la cuenca del río Pejibaye a partir de mapa de bosques de 1961, 2000 y datos de los Censos Agropecuarios de 1973 y 1984.

Las tierras de labranza en las décadas del 70 y 80 se mantuvieron cerca del 18 a 19% y los cultivos permanentes entre 8 y 9%. El pasto fue el uso dominante con un 48 a 53%. A partir de la segunda mitad de la década del 80 y hasta el año 2000, el cambio más importante en uso-cobertura fue la reducción en cultivos (especialmente maíz y frijoles) y el aumento en el área dedicada a café. Entre 1973 y el 2000 se pasó de aproximadamente un 9% de área en cultivos permanentes a un 20%. El mapa de uso-cobertura del año 2000 indica que el 75% de la cuenca se mantenía en pasto y por tanto es muy posible que las áreas de café correspondan a áreas de bosques taladas entre 1985 y 1990; así como a algunas zonas de cultivos; especialmente en el sector norte y central de la cuenca. Estas plantaciones se establecieron en suelos profundos, de texturas finas y en general en terrenos de pendiente moderadas.

Los datos de descarga máxima en 24, 48 y 72 horas de la cuenca del río Pejibaye indican que los episodios de La Niña tienden a generar años lluviosos (Falla y Valverde, 2007) y mayores descargas máximas. El exceso de precipitación anual se distribuye principalmente en los meses de agosto a noviembre; periodo que coincide con la mayor saturación del suelo en la cuenca; lo que podría explicar el incremento en las descargas máximas de 24, 48 y 72hr.

Los datos indican que al igual que en otras localidades de latitudes extratropicales la fase fría de ENOS está asociada a un aumento en la descarga comparado con los años Niño. La relación entre descarga máxima y el Índice Oceánico (ONI, Niño 3.4), indica que un incremento en valores positivos tienden a generar años con mayor descarga y viceversa; sin embargo la relación muestra un alto grado de variabilidad. Si a consecuencia del calentamiento global se prevé un calentamiento del océano Pacífico y por tanto una tendencia a mas valores negativos de ONI entonces se esperaría una reducción en los eventos máximos en 24, 48 y 72 hr en la cuenca del río Pejibaye. Por otro lado, si se intensifica la fase fría de ENOS se esperarían mas años lluviosos y un aumento en las descaras máximas. Por ejemplo, Retana y Solano (2000) reportan una mayor proporción de años lluviosos durante el periodo 1970 a 1998-200 en la cuenca baja del río Tempisque (Región Chorotega; Pacífico Norte); y al igual que en Pejibaye, el exceso de lluvia se concentra con mayor probabilidad en los meses de agosto, setiembre y octubre, periodo en el que también se registra la mayor frecuencia de inundaciones. Varios investigadores han encontrado que existen una relación significativa entre las fases de ENOS y la respuesta hidrología de la cuenca en diferentes localidades del continente americano (Dracup, and Kahya, 1994; Marengo,1998; Hastenrath, 1990; Marengo, 1995; Mechoso and Perez, 1992; Waylen and Caviedes, 1986); sin embargo el efecto es localizado como lo demuestran las inundaciones de Perú del año 1983 asociadas, aunque no exclusivamente, al efecto de un año Niño fuerte (Waylen and Caviedes, 1986).

Ciclones tropicales, descargas extremas y uso-cobertura de la tierra

El Ciclón Tropical (CT) es un término genérico utilizado para designar el flujo circular de masas de aire húmedo y caliente de gran escala que se forma en los trópicos y subtrópicos caracterizados por vientos muy fuertes en los niveles bajos de la atmósfera; estos incluyen las tormentas tropicales (ciclones con una velocidad máxima sostenida entre 18 y 32 ms^{-1}), los huracanes (ciclones con una velocidad máxima sostenida superior a 33 ms^{-1}) y oros vórtices rotatorios más débiles.

Con frecuencia, en Costa Rica, se asocia a los huracanes y otros ciclones tropicales con abundante precipitación, periodos prolongados de lluvias (“temporales”) e inundaciones. La probabilidad de que un ciclón tropical impacte directamente Costa Rica es inferior a 5% (Alvarado,2003); sin embargo cuando se acercan a la costa Caribe ó cuando alcanzan categorías 4 ó 5 pueden provocar severas lluvias en la costa Pacífica, aumentos significativos en los niveles de agua de los cauces, desbordamientos e inundaciones. En el caso de los datos de la estación Pejibaye (1975-1995), los eventos máximo en 24, 48 y 72 horas están asociados a ciclones tropicales (22 de octubre de 1988, huracán Juana con 254 mm de lluvia en 24hr y Depresión Tropical Pert, 14-17 setiembre 1993 con 332 mm de lluvia en 24hr); la estación fue destruida por la descarga asociada al huracán César en 1996 con 370 mm de lluvia en 24 horas. El 15 de setiembre de 1993 la depresión Tropical Gert estuvo a 260 Km de la cuenca de

Pejibaye y el 21 de octubre de 1988 el huracán Juana con una categoría 3 estuvo a 352 Km de Pejibaye.

La respuesta hidrológica de la cuenca ante lluvias extremas ocasionadas y/o magnificadas por ciclones tropicales es compleja. En el caso de la cuenca de Pejibaye se puede asumir que el uso-cobertura de la tierra se mantuvo, desde un punto de vista hidrológico, estable entre 1970 y el 2000. El bosque pasó de aproximadamente un 20% en 1970 a un 3.5% en el 2000. Los pastos fueron la cobertura dominante durante todo el periodo con una cobertura de 48 a 75%.

Aun cuando los ciclones tropicales modifican la duración, cobertura e intensidad de la precipitación y pueden ocasionar avenidas extraordinarias, no es posible afirmar que todas las lluvias extremas y las descargas máximas están relacionadas a dicho fenómeno atmosférico y menos aún hacer predicciones locales a partir de datos globales. Las figuras 19 a 21 ilustran la respuesta de la cuenca ante la presencia de ciclones tropicales en el Mar Caribe bajo condiciones estables de uso-cobertura de la tierra.

El huracán Juana afectó a Costa Rica entre el 18 y el 24 de octubre de 1988. La estación Bolivia registró 254 mm de lluvia el 21 de octubre cuando el huracán alcanzó categoría 3 y se encontraba a 352 Km al noreste de la cuenca. Aun cuando el evento se registró en el mes de octubre, el suelo no estaba saturado, pues durante los 8 días previos solo se midieron 49.2 mm de lluvia, lo que equivale a una media de 6.2 mm/día. El coeficiente de escorrentía para el mes fue de 61.2%. La cobertura forestal estimada para la cuenca durante este evento fue 12%. El aumento en la descarga de la cuenca se registró el 22 de octubre, un día después de recibir los 254 mm de lluvia. Entre el 21 y el 25 de octubre la cuenca acumuló 558 mm, lo cual representa el 92% de la precipitación mensual. Para el día 11, la cuenca había vuelto a su descarga normal previo al efecto del huracán. A nivel nacional este huracán, junto con Cesar (Julio, 1996) y Kattie (octubre, 1955) son los que han ocasionado la mayores perdidas tanto en términos de vidas como económicos (Alvarado y Alfaro, 2003). Por ejemplo, el Gobierno de la República presupuestó un incremento de 217.8 millones de colones en el año 2001 para la reconstrucción red vial dañada por el Huracán Juana (Decreto 29698-H.23-JUL-2001).

La tormenta Tropical Bret afectó a Costa Rica entre el 4 y el 11 agosto de 1993. La estación Bolivia registró el 9 de agosto 62 mm de lluvia en 24hr. La grafica de precipitación y descarga acumulada no muestra ningún impacto de esta tormenta tropical en la respuesta hidrológica de la cuenca El coeficiente de escorrentía para el mes fue de 50.5%. La cobertura forestal estimada para la cuenca en el año 1993 fue de 8%.

La Depresión Tropical Gert afectó a Costa Rica entre el 14 y el 17 de setiembre de 1993. La estación Bolivia registró el 14 de setiembre 332 mm de lluvia en 24hr; lo cual se mostró como un incremento significativo en la descarga de la cuenca durante los días 14 (140 mm) y 15 (123 mm) de setiembre; en estos dos días la cuenca drenó el 79% de la lluvia recibida el 14 de setiembre. Al igual que con el huracán Juana, aunque el evento se registró en setiembre el suelo no se encontraba saturado ya que durante los 8 días previos solo había recibido 54.3 mm de lluvia (6.8mm/dñia). El coeficiente de escorrentía para el mes fue de 81.5%. La cobertura forestal estimada para la cuenca en el año 1993 fue de 8%. Aun cuando la condición de humedad antecedente en la cuenca fue muy similar a la observada durante el huracán Juana, su respuesta fue diferente (Cuadro 5). No existen datos de la respuesta hidrológica de la cuenca

para el. Huracán Cesar (24 al 29 julio 1996) con una lluvia de 370 mm en 24hr ni para el Huracán Mitch (22 oct-5 nov.) con una lluvia de 124 mm (22 oct) y 122 mm (28 oct); ya que la estación fue destruida por el primero.

Cuadro 9: Comparación de la respuesta hidrológica de la cuenca del río Pejibaye ante el efecto indirecto del Huracán Juana (1988) y la Depresión Tropical Gert (193).

Variable	Evento sin influencia de ciclón 1976 (Niño)	Huracán Juana 1988	Depresión Tropical Gert 1993
Mes	Octubre	octubre	setiembre
Días	18 octubre	18 al 24	14 al 17
Pt 24hr (mm)	69.9	253.4	332.0
Pt 24hr y 48hr (mm)	69.9	394.6	337.8
Q día 24hr (mm)	16.7	32.4	140.1
Q día 24hr y 48hr (mm)	44.5	162.3	263.2
Pt 8 días previos (mm)	80.0 (10 mm/día)	49.2 (6.2 mm/día)	54.3 (6.8mm/día)
Pt mes anterior (mm)	262.6	519.5	306.7
Coef. Escorrentía del mes (%)	79.2	61.2	81.5
Cobertura forestal estimada (%)	18	12	8

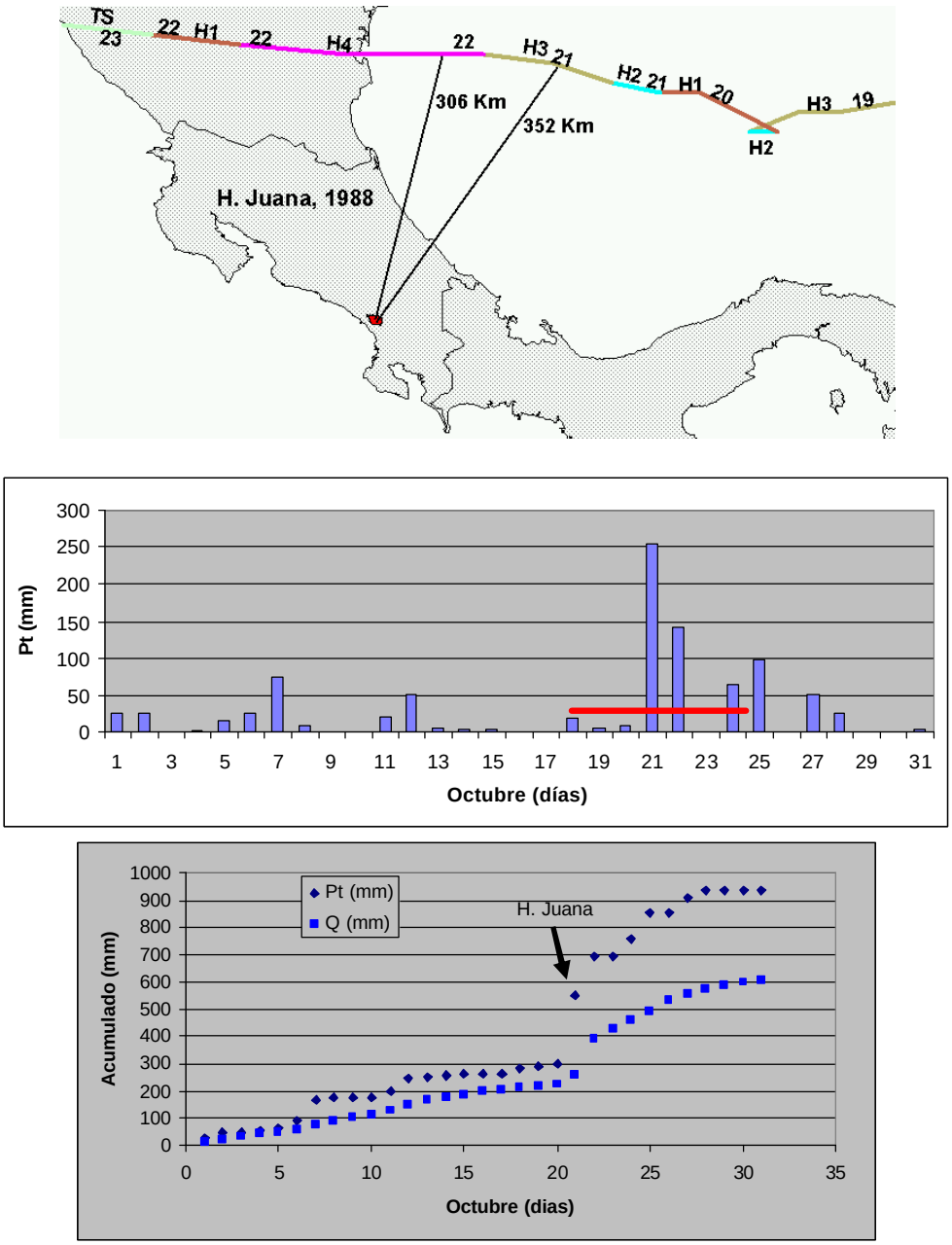


Figura 57: Precipitación y descarga acumulada para el mes de octubre de 1988. Huracán Juana 18-24 octubre 1988 con 254 mm de lluvia en 24hr (21 oct. Huracán Categoría 4). Cobertura forestal estimada 12%.

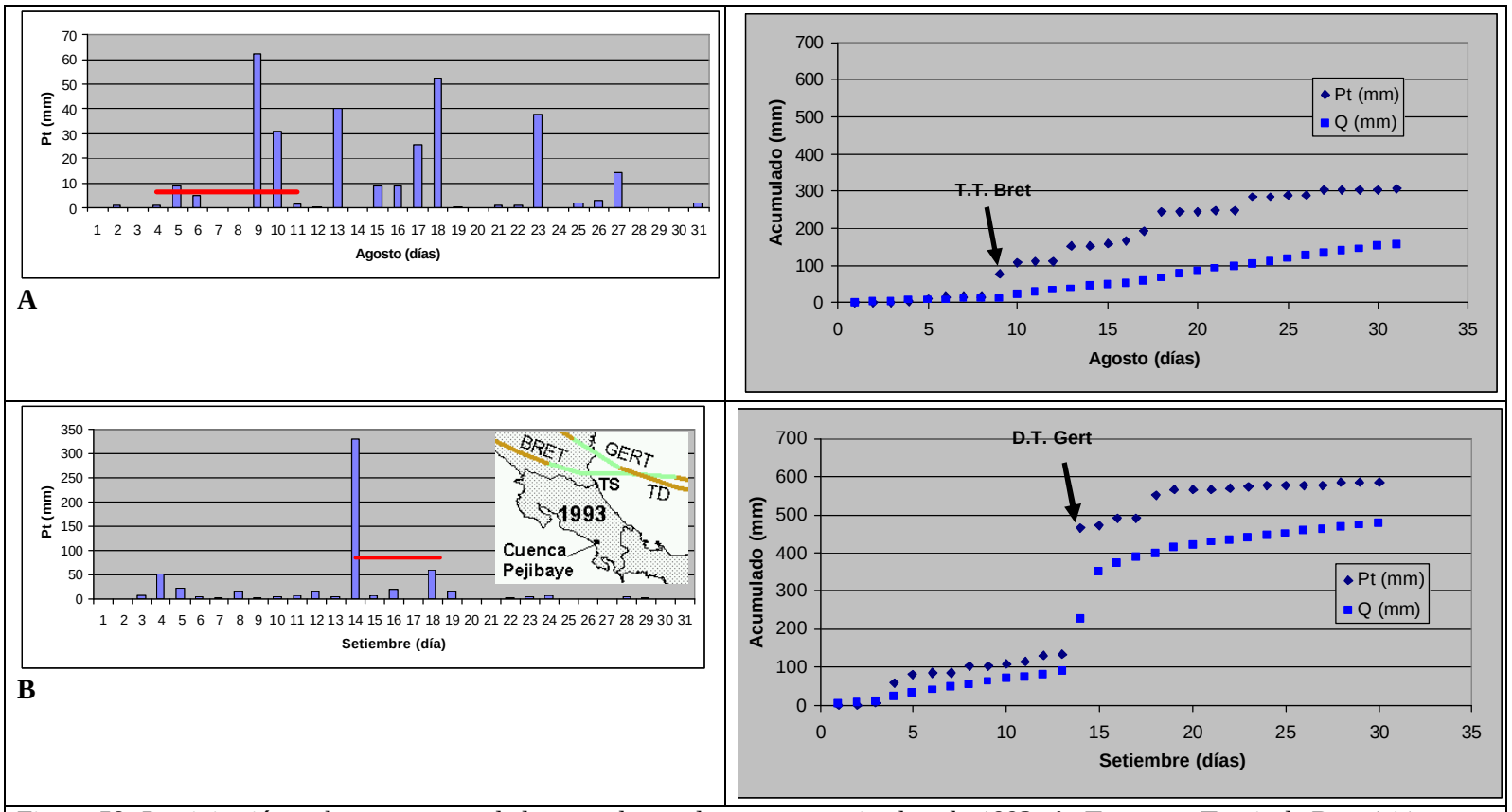
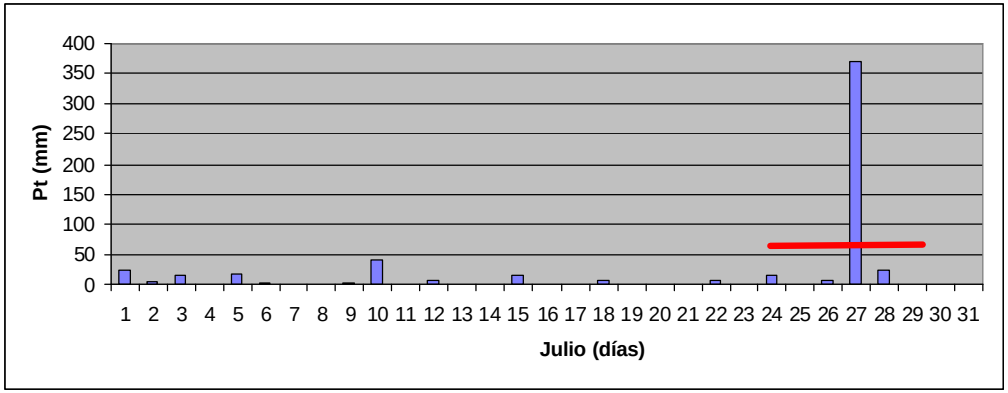
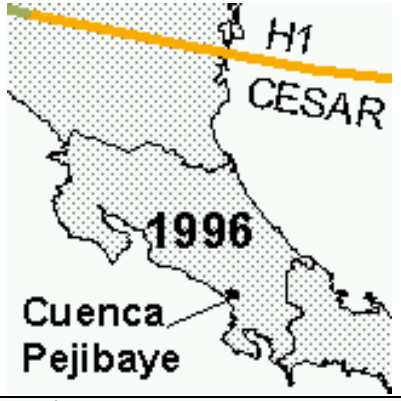
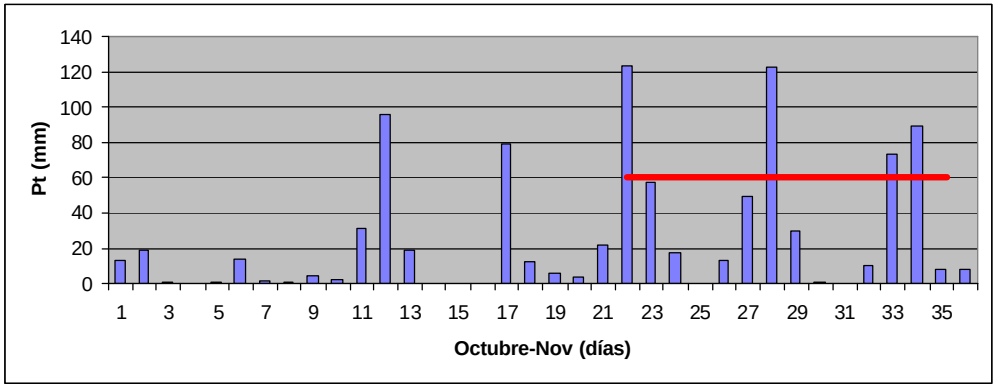


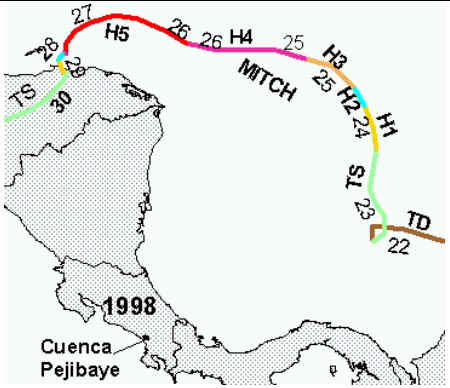
Figura 58: Precipitación y descarga acumulada para el mes de agosto y setiembre de 1993. A. Tormenta Tropical Bret 4-11 agosto 1993 con 62 mm de lluvia en 24hr. B. Depresión Tropical Gert 14-17 setiembre 1993 con 332 mm de lluvia en 24hr. Cobertura forestal estimada 7.8%.





A





B

Figura 59: Precipitación y descarga acumulada para el mes de julio 1996 y octubre de 1998. A. Huracán Cesar 24 al 29 julio 1996 con 370 mm de lluvia en 24hr. 27 Julio Huracán categoría 1. B. Huracán Mitch 22 oct-5 nov. 1988 con 124 mm (22 oct) y 122 mm (28 oct) en 24hr. Total en 14 días 603 mm. Cobertura forestal estimada 5-6%.

Conclusiones

En el presente trabajo se investigó la variación en la descarga anual, máxima en 24, 48 y 72 horas e instantánea; así como sus respectivos periodos de retorno en la estación Pejibaye (No.98011, 360 msnm); ubicada en el río del mismo nombre, Pacífico Sur, Costa Rica durante 1975-1995 y su relación con el uso-cobertura de la cuenca, los episodios de ENOS y los ciclones tropicales.

La cuenca del río Pejibaye no sufrió cambios significativos en su uso-cobertura durante el periodo de estudio; aunque si se observó un reemplazo de pastos por café en la sección norte y oeste de la cuenca a partir de la década del 80. El coeficiente medio anual de escorrentía de la cuenca durante los 21 años del registro (1975-1995) fue de 61.5%; detectándose una diferencia significativa (Kruskal-Wallis P=0.04) entre la razón de escurrimiento (Q/P) de los diferentes episodios del ENOS. Durante los años Niña, el 63% de la precipitación se convirtió descarga, en tanto que en años Niño dicho valor descendió a un 54%. La prueba LSD de Fisher (alfa 0.05) detectó como significativa solo la diferencia Neutro-Niño.

El balance de masa de la cuenca (Q_Pejibaye–P_Bolivia) indica que en promedio la evapotranspiración fue de 786 mm (CV=16%) en el periodo 1975-95, así como en los años Niño (785 mm), reduciéndose en los años Neutros (718mm) y aumentando en los años Niña (909mm); sin embargo la prueba LSD de Fisher (P=0.05) solo detectó como significativa a la diferencia Niña versus Neutro. Un 92% de la variabilidad en las desviaciones en la descarga anual se deben a la variación en las desviaciones de la media en precipitación.

No se detectó ningún patrón o tendencia temporal significativa en la descarga anual durante el periodo analizado (1975-1995); auque los episodios de ENOS sí tienen una marcada influencia en la descarga media anual de la cuenca. Durante años Niña la escorrentía total anual es mayor comparada con años Niño ó Neutros (Mann-Whitney, P=0.01). La diferencia en descarga media entre años Niña y Niño fue de 641 mm en tanto que para años neutros fue de 170 mm. De los siete años Niño, el 100% presentó desviaciones negativas; durante los años Niña, el patrón se invirtió ya que el 80% de los años corresponden a desviaciones positivas. Para los años neutros solo el 33% corresponde a desviaciones negativas. La prueba LSD de Fisher (alfa 0.05) detectó como significativas las comparaciones Niña-Niño y Neutro-Niño.

Los años Niña, en comparación con los Niño, tienden a estar asociados a eventos con descargas máximas mayores en 24hr (mediana 57.6 mm Vs 27.0 mm), 48hr (92,4 Vs 44.5mm) y 72hr (109.7mm Vs 54.3mm Vs); sin embargo debido al tamaño de la muestra y la alta variabilidad del set de datos las mismas no fueron detectadas como estadísticamente significativas (Kruskall-Wallis, P>0.059).

Las descargas máximas en 24, 48 y 72 hr muestran una correlación positiva con el índice Oceánico El Niño (ONI, Niño 3.4) de los meses de agosto, setiembre y octubre. La tendencia indica que al intensificarse la fase calida de ENOS se reduciría la cantidad de precipitación y por tanto también el valor de las descargas máximas. La relación es menos consistente para años neutros y Niñas; sin embargo la tendencia indica que existe una mayor probabilidad de que durante años Niña se generen descargas mayores.

El 81% de los años presentaron descargas máximas en 24hr con periodos de retorno iguales o inferiores a 10 años (Q <98.8mm). Para la descarga máxima en 24hr los dos eventos mayores corresponden a la Depresión Topical Gert (1993) y el huracán Juana (1988). El patrón es similar para las máximas en 48 y 72 horas. No se observó ningún patrón en cuanto a descenso/ascenso en los periodos de retorno de descargas máximas en 24, 48 y 72 horas durante el periodo 1975-1995.

En general, los años Niño tienden a caracterizarse por eventos máximos en 24hr con períodos de retorno iguales o inferiores a 2 años (máximo de 36 mm) en tanto que los años Niña y neutros tienen eventos con periodos de retorno entre 2 y 10 años (36 a 98.8 mm por día).

Excluyendo los niveles de agua asociados al huracán Juana y la Depresión Tropical Gert, se registraron 6 eventos superiores a 2.58 m (percentil 75); de los cuales dos corresponden a Niñas, tres a neutros y uno a Niño; los eventos se repartieron tres en la década del 70, dos en la década del 80 y uno en la década del 90.

En síntesis, el análisis permite concluir que aun cuando el uso-cobertura de la tierra influye en el comportamiento hidrológico de la cuenca, no puede amortiguar el efecto de variaciones climáticas severas como las ocasionadas por el fenómeno ENOS y en especial por los ciclones tropicales. La evidencia indica que de acentuarse en el futuro los años Niño a consecuencia del calentamiento Global se podría esperar una reducción en la frecuencia de ciclones tropicales así como una reducción en las descargas máximas en 24hr en el río Pejibaye. Esto, aunado a una buena gestión de la cuenca podría asegurar ingresos para sus pobladores en el largo plazo. La recuperación del bosque en zonas degradadas y de fuerte pendiente; así como el uso de café con sombra y sistemas agroforestales-agrosilvopastoriles podrían ayudar a mitigar el efecto de avenidas no extremas; no así los eventos extremos como los observadas en la cuenca durante la década del 90.

Agradecimientos. El presente trabajo se realizó gracias al apoyo del contrato INCO-CT2004-510739. EPIC-FORCE. Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt. Los autores agradecen al Instituto Costarricense de Electricidad por suministrar los datos de lluvia diaria de las Estaciones, Bolivia, San Martín, Cristo Rey y Agua Buena. Se agradece al Dr. James Bathurst de la Universidad de NewCastle Upon Tyne por invitarnos a participar en este proyecto.

Referencias

ACAN-EFE y Redacción. Tegucigalpa. 2003. Prevén invierno irregular en istmo. Internacionales. Nacion.com. http://www.nacion.com/ln_ee/2003/abril/20/mundo6.html

ACAN-EFE. 2002. Hondureños que clamaban por agua ahora se quejan por abundancia de lluvia. Miércoles 12 de junio, 2002 10:41:00 (Hora local). http://www.nacion.com/ln_ee/2002/junio/12/ultima4.html

ACAN-EFE. 2001. Defensa civil de Nicaragua vigila ríos del Caribe ante eventuales inundaciones. Lunes 13 de agosto, 2001 11:35:00 (Hora local). http://www.nacion.com/ln_ee/2001/agosto/13/ultima6.html

ACAN EFE. 2001a. Latinoamérica mantiene alta vulnerabilidad en materia ambiental, según ONU. Viernes 18 de mayo, 2001 11:54:00 (Hora local). http://www.nacion.com/ln_ee/2001/mayo/18/ultima4.html

ACAN-EFE. 2000. Istmo se quedará sin bosques en 15 años. Natura grita agobiada. http://www.nacion.com/ln_ee/2000/julio/09/mundo4.html

Acón y asociados, 1991. Manual descriptivo de la leyenda del mapa de asociaciones de subgrupos de suelos de Costa Rica Escala 1:200.000. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. San José, Costa Rica.

Adamson Badilla Marcos. Desastres en Centroamérica: una ancla para el desarrollo humano sostenido y una agenda para estrategia de prevención. Centro de Estudios Económicos y Ambientales CIESA. Presentando en el Foro Mitch +5 Diciembre, 2003. 17p.

Adame Garza, Jorge y Estrada Bellmann, Pedro. 2003. Efecto de una doble concentración de bióxido de carbono en la atmósfera sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río Guayalejo-Tamesí en el estado de Tamaulipas, México. Revista de Climatología. Vol. 3:27-44. http://www.geocities.com/reclim05/reclim03d.pdf

Adger N, et al. 2007. Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 23pp. Disponible en http://www.ipcc.ch.

Agencia EFE. Río de Janeiro. 2000. Tala en Amazonia puede alterar clima en hemisferio norte Deforestación sin piedad. http://www.nacion.com/ln_ee/2000/agosto/13/mundo10.html

Alfaro, Eric J. 2007. Escenarios climáticos para temporadas con alto y bajo número de huracanes en el Atlántico. Vol. 7:1-13 Revista de Climatología. http://webs.ono.com/reclim/reclim07a.pdf

Alexander, L. V., et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, J. Geophys. Res., 111, D05109. http://hadobs.metoffice.com/hadex/HadEX_paper.pdf

Alley R, et al. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 21pp. Disponible http://www.ipcc.ch.

Alvarado L y Alfaro E. 2003. Frecuencia de los ciclones tropicales que afectaron a Costa Rica durante el siglo XX. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, 10(1): 1-11.

Australian Goverment Bureau of Meteorology. 2007. Southern Oscillation Index (SOI). Canberra. Australia. Disponible en http://www.bom.gov.au/climate/current/soi2.shtml

Baldwin, M.P. et al., 2001.The Quasi-Biennial Oscillation. Rev. Geophys., **39**, 179–229.

Biondi, Franco and Cayan D. R.2001. North Pacific Decadal Climate. Variability Since AD. 1661. Journal of Climate, Volume 14, Number 1, pp. 5-10, January 2001. http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/pubs/biondi2001/biondi2001.html

Brown, B. G. and Katz, R. W. 1995. Regional analysis of temperature extremes: Spatial analog for climate change?, J. of Climate 8:108–119.

Bruijnzeel, L. A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems and Environment. 104:185-228.

Bruijnzeel, L. A. 1990. Hydrology of tropical moist forest and effects of conversion: A state of knowledge review. UNESCO, Paris, and Vrije Universiteit, Amsterdam.

Calder, 2002. Forest and hydrological services: reconciling public and science perceptions. Centre for Land Use and Water Resources Research. University of Newcastle upon Tyne. UK. 62p. http://www.tropenbos.nl/files/Verweij/011Calder.pdf

Calvez, Manny. 2004. Philippines: NE Mayor vows to get rid of illegal logging in 90 days. 2004, Philippine Star. Date: December 6, 2004. The Philippine Star. http://www.illegal-logging.info/item_single.php?item=news&item_id=584&approach_id=

Carr, R., 2007, XLStatistics 06.08.27, XLent Works, Australia. http://www.deakin.edu.au/~rodneyc/xlstats.htm

Cavazos, Teresa y Rivas, David. 2004. Variability of extreme precipitation events in Tijuana, Mexico. Climate Research. Vol. 25: 229–243: 229-243.

Chicago Tribune Web Edition. 2007. FEMA: More than $12M in grants and loans awarded to flood victims. Associated Press. 1:09 PM CDT, October 19, 2007

Clarke, M. L. and Rendell, H. M. 2006. Hindcasting extreme events: the occurrence and expression of damaging floods and landslides in Southern Italy. Land Degradation & Development VoL: 17: NO: 4: 365-380. 2006

Climate Prediction Center. 2007 Cold and Warm Episodes by season 1951-2007. National Weather Service. NOAA-USA. http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

Costa Rica. sf. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). Impacto directo de los desastres naturales declarados en Costa Rica: 1988-2001. Sistema de Indicadores sobre Desarrollo Sostenible (SIDES). http://www.mideplan.go.cr/sides/ambiental/32-1.htm

Crutcher, H.L., Neumann, C.J. and Pelissier, J.M. 1982. Tropical cyclone forecast errors and the multimodal bivariate normal distribution. Journal of Applied Meteorology, 21 (7), 978-987.

Diamond, H.J., 2006. Review of recent tropical cyclone climatological research. Island climate update, v. 72, 6 (1 p.) http://www.niwascience.co.nz/ncc/icu/2006-09/icu-2006-09.pdf

Diaz, H.F. and Quayle, R.G. 1980. Climate of the United States since 1895: spatial and temporal changes. Monthly weather review, 108 (3), 249-266.

Doughton, Sandi. 2005. The truth about global warming. Seattle Times. Tuesday, October 11, 2005 - Page updated at 01:23 PM.
http://seattletimes.nwsource.com/html/nationworld/2002549346_globewarm11.html

Dracup, J. A and E. Kahya. 1994. The Relationships between U.S. Streamflow and La Niña Events, Water Resources Research 30 (7) 2133-2141, 1994.

Easterling D.R., et.al. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. Bull Am Meteorol Soc 81:417–425

Ekström, M., et. al. 2005. New Estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies. J. Hydrology 300:234–251.

Emanuel, K. A. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature, 436 (4-August2005): 686-688.

Enquist, C.A.F. 2002. Predicted regional impacts of climate change on the geographical distribution and diversity of tropical forests in Costa Rica. J. Biogeography. 29(4): 519-534.

Fallas y Valverde, 2007. Aplicación de ENOS como indicador de cambios en la precipitación máxima diaria en la cuenca del río Pejibaye y su impacto en inundaciones. Ponencia III Congreso Iberoamericano sobre Desarrollo y Ambiente, CISDA 2007.Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. 30p.

Fallas y Valverde, 2007a. Inundaciones en Costa Rica y estudio de caso en una cuenca forestada del Caribe Costarricense: Evidencia de los últimos 34 años. Ponencia Congreso Geoprocesamiento 2007. Centro Nacional de Alta Tecnología-Consejo Nacional de Rectores. San José, Costa Rica. 22p.

Fonseca, Pablo. Q. 2007. Cambio climático producirá sequías e inundaciones aquí. Noticias Aldea Global. La Nación Digital. Pablo Fonseca Q. pfonseca@nacion.com.
http://www.nacion.com/ln_ee/2007/agosto/14/aldea1199145.html

Fowler, H. J. and Kilsby, C. G. 2003. A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. International Journal of Climatology. VoL. 23. N0. 11:1313-1334.

Fowler, H. J., et. al. 2005. New Estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 1. Assessment of control climate. J. Hydrology 300:212–233.

Frich, P. et. al. 2002.Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research, Vol. 19: 193–212.

Fu, Q. and Johanson, C. M.. 2005. Satellite-derived vertical dependence of tropical tropospheric temperature trends. Geophys. Res. Lett., 32, L10703.
http://www.atmos.washington.edu/~qfu/Publications/grl.fu.2005.pdf

Fueglistaler, S. and Q. Fu, 2006: Impact of clouds on radiative heating rates in the tropical lower stratosphere. J. Geophys. Res., 111, D23202.
http://www.atmos.washington.edu/~qfu/Publications/jgr.fueglistaler.2006.pdf

Fuentes, J. 1994. Inquietud por sequía en el país. La República. San José, CR. Oct 11:3A.

Gilleland, Eric and Katz, Richard W. 2006. Analyzing seasonal to interannual extreme weather and climate variability with the extremes toolkit. Research Applications Laboratory, National Center for Atmospheric Research.
http://www.assessment.ucar.edu/pdf/Gilleland2006revised.pdf.

Goswami, et. al., 2006. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. Science, Vol. 314: 1442-1445.

Gray, William M. et. al. 1999. Extended range forecast of Atlantic seasonal hurricane activity and us landfall strike probability for 1999.
http://hurricane.atmos.colostate.edu/Forecasts/1999/fcst99/

Greenpeace. 2007. Group: Logging, global warming to trigger more floods. January 31, 2007.
http://www.abs-cbnnews.com/storypage.aspx?StoryId=26513

Grove, Richard H. 1998. Global impact of the 1789-93 El Niño. Nature 393, 318-319.

Guha-Sapir, D. and Hargitt, D. Hoyois. 2004. Thirthy years of natural disasters 1974-2003: The numbers, Presses Universitaires de Louvain: Louvain-la Neuve.
http://www.em-dat.net/publications.htm

Hale R.C., et. al. 2006. Land use/land cover change effects on temperature trends at U.S. climate normals stations. Geophysical Research letters, 33, L11703.

Hastenrath, S. 1990. Diagnostics and Prediction of Anomalous River Discharge in Northern South America, Journal of Climate, Vol 3, 1080-1096, 1990.

Haylock, et. al. 2006. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. Journal of climate, 19, 1490-1512.

Instituto Meteorológico Nacional. 2005. Vulnerabilidad Actual de la zona noroccidental del Valle Central de Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía. San José, Costa Rica Marzo 2005. 57p.

Instituto Meteorológico Nacional. 2000. Primera comunicación nacional ante la convención marco de cambio climático. Ministerio del Ambiente y Energía. 116p.

IPCC. 2001. Climate Change 2001:Working Group I: The Scientific Basis. Appendix I - Glossary. p.790. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/pdf/TAR-APPENDICES.PD

Jiménez Pérez, Nayibe. 2006. Inventarios históricos de desastres como instrumentos para la gestión de riesgos una visión del caso Colombiano. Jornadas Iberoamericanas sobre inundaciones y desastres naturales AECI-CYTED. Antigua (Guatemala), 5 a 9 de junio de 2006 36p. http://hercules.cedex.es/hidraulica/PROHIMET/GU06/Taller2/Jimenez.pdf

Jiménez, Quírico. 2005. Menos bosques, más inundaciones. El precio de la tala es muerte y destrucción. http://www.nacion.com/ln_ee/2005/enero/17/opinion5.html

Kaimowitz, David. 2005. Logging and Floods: A Watertight Argument? Arborvitae. No. 27: p.10. . http://www.panda.org/downloads/forests/arborvitae27.pdf

Karl, T.R. 2006. Changes in intense precipitation events: What do we know? (Nowcast) Bulletin of the American Meteorological Society, 87 (6), 734-735.

Karl T. R. and Easterling, D. R. 1999. Climate extremes: selected review and future research directions. Clim Change 42: 309–325.

Kerr, R.A., 2006. A Tempestuous Birth for Hurricane Climatology. Science, 312 (5-May-2006):676-678.

Khanal, N. R., Shrestha, M and Ghimire, M. L. 2007. Preparing for Flood Disaster: Mapping and Assessing Hazard in the Ratu Watershed, Nepal . The International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD).
http://books.icimod.org/index.php/downloads/publication/134

Kiladis, G. and H. F. Diaz. 1989. Global climatic anomalies associated with extremes of the Southern Oscillation. Journal of Climate, 9, p.1069-1090.
http://ams.allenpress.com/archive/1520-0442/2/9/pdf/i1520-0442-2-9-1069.pdf

Klein Tank, et. al. 2006. Changes in daily temperature and precipitation extremes in Central and South Asia. Journal of Geophysical Research, Atmospheres, 111, D16105.

Klotzbach, P. J. 2006. Trends in Global Tropical Cyclone Activity over the past Twenty Years (1986-2005). Geophysical Research Letters, 33, L100805.

Klotzbach, Philip J. and Gray, William M. 2006. Summary of 2006 Atlantic tropical cyclone activity and verification of author's seasonal and monthly forecasts. pp.44-47. Department of Atmospheric Science, Colorado State University. Fort Collins, CO 80523.
http://typhoon.atmos.colostate.edu/forecasts/2006/nov2006/nov2006.pdf

La Nación. 1987. Prevén peor sequía en últimos 10 años. La Nación, San José, CR. Nov 8:6A.

Landsea, C.W., 2005. Hurricanes and Global Warming. Nature, 438 (29 December 2005): E11-12.

Landsea, C. W., 1993. A climatology of intense (or major) Atlantic hurricanes. Mon. Wea. Rev., 121, 1703-1713.

Landsea, C. W. and Gray, W. M. 1992. The strong association between western Sahelian monsoon rainfall and intense Atlantic hurricanes. J. Climate, 121, 1703-1713.

Landsea, et. al. 1996. Downward trends in the frequency of intense Atlantic hurricanes during the past five decades. Geo. Res. Letters, 23, 1697-1700.

Landsea, C.W., et. al. 2006. Can We Detect Changes in Extreme Tropical Cyclones? Science, 313: 452-454.

Lee, Richard. Forest microclimatology. 1978. New York, Columbia University Press. 276 p.

Lott, N. and Ross. T. 2006. Tracking and evaluating U.S. billion dollar weather disasters, 1980-2005. 86th AMS Annual Meeting, 29 January - 2 February 2006, Atlanta, Georgia. American Meteorological Society, Boston, MA, (1.2), 7 p.

Levinson, D.H., et. al. 2006. Annual analyses of basin and hemispheric tropical cyclone indices. 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 24 - 28 April 2006, Monterey, CA. American Meteorological Society, Boston, MA, (2C.4) 5 p. (April 2006).

Marengo, J. A. 1995. Variations and Change in South American Streamflow, Climatic Change 31, 99-117.

Marengo, J. A.. 1998. Trends in Streamflow and Rainfall in Tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru, Journal of Geophysical Research, Vol 103, No D2, 1,775-1,783.

Mechoso, C. and Perez, G. Iribarren. 1992. Streamflow in Southeastern South America and the Southern Oscillation, Journal of Climate, Vol 5, 1535-1539, 1992.

Mccarthy, Michael. 2007. "Why 'extreme events' are likely to become the norm". Independent, The (London). Jun 26, 2007.
http://findarticles.com/p/articles/mi_qn4158/is_20070626/ai_n19321249

Miranda, M.; Otoya, M. y Gutiérrez, M. 2005. Revisión de las políticas y medidas de adaptación actuales ante la vulnerabilidad del sistema hídrico al clima actual en el área del proyecto. Proyecto Adaptación del Sector Hídrico al Cambio Climático. Proyecto Fomento de las Capacidades para la Etapa II Adaptación al Cambio Climático en Centroamérica, México y Cuba. ACCII-PNUD-IMN. Centro Internacional de Política Económica de la Universidad Nacional (CINPE-UNA). San José, Costa Rica. 84p.

Nandintsetseg, B.; Greene, J. S. and Goulden, C. E. 2007. Trends in extreme daily precipitation and temperature near lake Hövsgöl, Mongolia. International Journal of Climatology. VoL: 27 NO: 3: 341-347.

Nicholls and Alexander, 2007. Has the climate become more variable or extreme? Progress 1992-2006. Progress in Physical Geography 31:1(1-11).

Nicholls N and Murray W.1999.Workshop on indices and indicators for climate extremes: Ashville, NC, USA, 3–6 June 1997—Breakout Group B: Precipitation. Clim. Change 42: 23–29.

Osnos, Evan. 2006. The hidden cost of your hardwood floor. The demand for Chinese goods is driving destructive logging around the globe. Tribune special report. December 18, 2006. http://www.chicagotribune.com/news/specials/chi-china-special,0,6789511.special

Pachauri, R. K. 2002. "Is there a nexus with global climate change? - Extreme Weather". UN Chronicle. Dec 2002. http://findarticles.com/p/articles/mi_m1309/is_4_39/ai_96951869

Pauling, A. and Paeth, H. 2007. On the variability of return periods of European winter precipitation extremes over the last three centuries. Climate of the Past Year, Vol: 3 Issue:1

Peterson, Thomas C. et. al. 2003. Detección del cambio climático. Boletín de la Organización Meteorológica Mundial, Vol. 52, Nº. 3, 2003: 252-258.

Pielke, R. A., et. al. 2005. Hurricanes and Global Warming. Bulletin of the American Meteorological Society, 86(11): 1571-1575.

Pielke, Roger, Jr. and Landsea, Christopher W. 1999. La Niña, El Niño, and Atlantic Hurricane Damages in the United States. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80, 2027-2033. http://www.aoml.noaa.gov/hrd/Landsea/lanina/

Pilon, P. J. and Harvy, K. D. 2001. Consolidated Frequency Analysis (CFA) versión 3.1. Reference manual. Environmental Canada. Ottawa, Ontario, Canada. 1993. 91p. + anexos. Disponible en http://www.trentu.ca/academic/wsc/software.shtml

Ponce, V. M. 1989. Engineering Hydrology, Principles and Practices. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. http://ponce.sdsu.edu/330textbook_hydrology_chapters.html

Pounds, A.; Puschendorf, R. 2004. Clouded futures. Nature. Vol 427. January: 107-108.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. La reducción de riesgos de desastres: Un Desafío para el desarrollo, un informe mundial.. Dirección de Prevención de Crisis y de Recuperación. 2004. 146p. (disponible en www.undp.org/bcpr)

Programa Estado de la Nación.2004.Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2004. Proyecto Estado de la Nación, San José, Costa Rica. . http://www.estadonacion.or.cr/

Quesada y Arley. 2007. “Con el agua en la cintura empecé a pegar gritos ”. Comisión de Emergencias estima daños en más de ¢100 millones. aarley@aldia.co.cr. Al Día, Costa Rica. http://www.aldia.co.cr/ad_ee/2007/octubre/05/nacionales1265086.html

Retana, José y Solano, Johnny. 2000. Relación entre las inundaciones en la cuenca del tempisque, el fenómeno de La Niña y los rendimientos de arroz de secano. Gestión de Desarrollo, Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica. 9p.

Retana, José y Villalobos, Roberto. 2000. Caracterización pluviométrica de la fase cálida de ENOS en Costa Rica con base en probabilidades de ocurrencia de eventos en tres escenarios: seco, normal y lluvioso. Top. Meteor. Oceanog., 7(2):124-131.

Retana, José y Villalobos, Roberto. 2001. Eventos extremos meteorológicos en Linda Vista, Valle del Guarco, Cartago. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. 9(1):49-56.
Retana, José y Villalobos, Roberto. 2003. Impacto social del fenómeno El Niño. Un recuento de 1977 – 1978. Top. Meteoro. Oceanog. 10 (1) 36-40.

Reuters Foundation. 2006. Floods in southeast Asia force thousands to flee. 23 Dec 2006 08:30:00 GMT AlertNet. http://www.alertnet.org/thenews/newsdesk/SP142366.htm

Sánchez, et. al., 2006. Estudio de Monitoreo de Cobertura Forestal de Costa Rica 2005. I. Parte: Clasificación de la Cobertura Forestal con Imágenes Landsat ETM+ 2005. Proyecto ECOMERCADOS, Fondos Gef – Ecomercados. Convenio De Donación Tf 023681. 37p.

Sanker, SriGowri and Nakano, Hajime.(Eds). 2006. Natural Disaster Data Book-2005 (An Analytical Overview). Asian Disaster Reducction Center. Japan. 88p.
http://www.adrc.or.jp/publications/databook/databook_2005_eng/eng.html

Santer, B.D, et. al. 2005. Amplification of Surface Temperature Trends and Variability in the Tropical Atmosphere. Science, 309, 1551-1556.
http://www.atmos.washington.edu/~qfu/Publications/science.santer.2005.pdf

Shein, K., A. (Ed.). 2006: State of the Climate in 2005. Bulletin of the American Meteorological Society, 87, S1-S102.

Shein, K., A. 2006. Assessing the long-term representativeness of short wind records. 86th AMS Annual Meeting, 29 January - 2 February 2006, Atlanta., Georgia. American Meteorological Society, Boston, MA, 4 p. (January 2006).

Smith, T.M., Yin, X. and Gruber, A. 2006. Variations in annual global precipitation (1979-2004), based on the global precipitation climatology project 2.5° Analyses. Geophysical Research letters, 33, L06705.

Solano, J.; Retana, J. y Villalobos, R. 2002. Inundaciones. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos. 9(2):104-122

Solera, C. 2000. Impacto de El Niño en el sector agua potable de Costa Rica durante 1997-1998. Congreso sobre la Reducción de Impactos de Variabilidad Climática: El Caso de El Niño de 1997-1998 en Costa Rica. Acueductos y Alcantarillados. San José, 3 y 4 de febrero de 2000. sp.

Soon W, et. al. 2003. Reconstructing Climatic and Environmental Changes of the Past 1000 Years: A Reappraisal. Energy & Environment, Volume 14, Numbers 2-3: 233-296(64).

Tank, A. M. Klein, G. 2006. Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia. Journal Of Geophysical Research, VOL. 111, D16105, http://www.knmi.nl/publications/fulltexts/2005jd006316.pdf

The Seattle Times. 2005. Proving global warming. A world of evidence says global warming is real. Sunday, October 9, 2005: Page updated at 12:00 a.m. http://seattletimes.nwsource.com/news/nation-world/globalwarming/1.html

Trenberth, K., 2005. Uncertainty in Hurricanes and Global Warming. Science, 308: 1753-1754.

United Nations. The Millennium Development Goals Report 2007. NEW YORK, 2007. 26p. http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Resources/Static/Products/Progress2007/UNSD_MDG_Report_2007e.pdf

UN FAO and CIFOR.2005. Forests and floods: Drowning in fiction or thriving on facts? RAP Publication 2005/03; Forest Perspectives 2 Food & Agriculture Organization of the United Nations and the Center for International Forestry Research, Bangkok. 30p.

Valverde, L. 2001. Nuevo ministro alerta sobre sequía. La República. San José, CR. Ago 10:8A

Webster, P. J., Holland, G. J., Curry, J. A. and Chang, H.-R., 2005. Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. Science, 309 (16 September 2005): 1844-1846.

Wardlaw, R. B. ; Hulme, M; and Stuck Y. 1996. Modelling the Impacts of Climatic Change on Water Resources Water and Environment Journal 10 (5): 355–364.

Waylen, P. R. and C. Caviedes. 1986. El Niño and Annual Floods on the North Peruvian Littoral. Journal of Hydrology 89, 141-156, 1986.

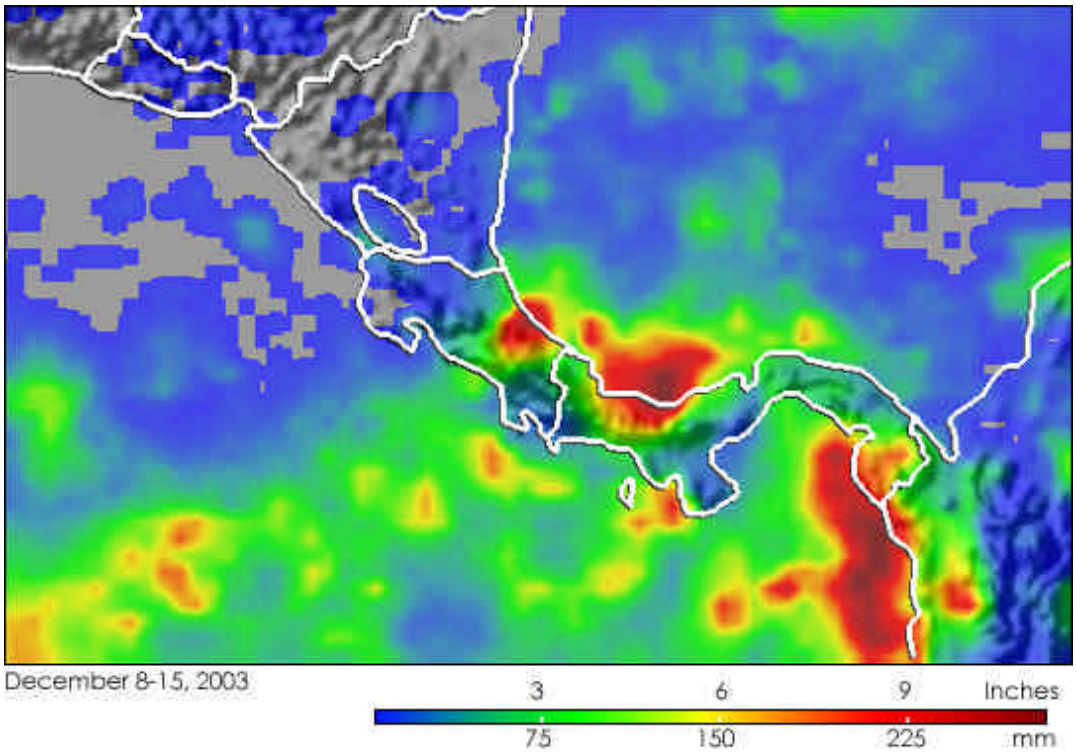
Wettstein, J. J. and Mearns, L. O. 2002. The influence of the North Atlantic-Arctic Oscillation on mean, variance and extremes of temperature in the northeastern United States and Canada, J. of Climate 15:3586–3600.

Xu, M., et. al. 2006. Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969 - 2000: evidence from direct ground measurements of wind speed. Journal of geophysical research, atmospheres (accepted 7/06). NCDC Online

Yunling, He and Yiping, Zhang. 2005. Climate Change from 1960 to 2000 in the Lancang River Valley, China. Mountain Research and Development Vol 25 No 4 Nov 2005: 341–348.

Anexo1: Intensas lluvias e inundaciones en Costa Rica.

Un frente frío de origen atlántico y un sistema de baja presión produjeron intensas lluvias entre el 11-13 de diciembre del 2003 a lo largo de la costa Caribe, generando inundaciones y deslizamientos. NASA Earth Observatory



Mapa de precipitaciones totales registradas entre el 8 y 15 de diciembre del 2003. Las zonas en rojo oscuro llegaron a totalizar más de 225 mm (Ej. inmediaciones de Limón). Una de las áreas más afectadas fue la zona costera de Costa Rica. Estimaciones basadas en el sensor TRMM. Crédito NASA http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/shownh.php3?img_id=11886

Anexo 2: Inundaciones en imágenes

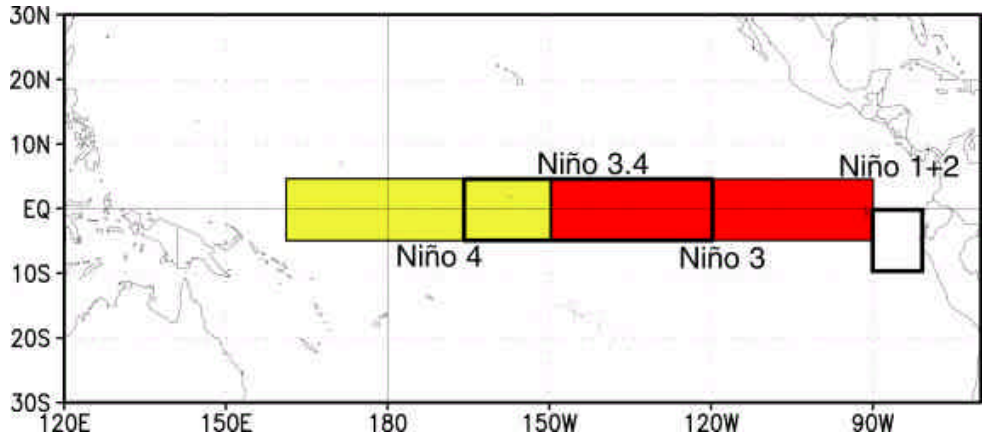
Poblado de Sixaola. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias de Costa Rica (CNE) Sixaola, Limón 2005. Toma aérea de las zonas afectadas por las inundaciones en la cuenca baja del río Sixaola

Sixaola Diciembre 2002
http://www.internationalministries.org/newsletters/journal.asp?journalID=573&id=99

Inundación del 29 de noviembre al 1 de diciembre. Zonas afectadas vertiente Caribe y zona Norte. Ríos desbordados Estrella, Chirripó-Matina, Barbilla, Banano-Bananito, Sixaola. http://www.paho.org/Images/dd/PED/cr02-01.jpg

Sarapiquí, Costa Rica. Enero 2005. El presidente de Costa Rica, Abel Pacheco, declaró el estado de emergencia luego de que fuertes lluvias causaron inundaciones que han dejado a más de siete mil personas damnificadas. El Instituto Meteorológico Nacional costarricense informó que las precipitaciones alcanzaron entre el domingo y el lunes un nivel de 350 litros por metro cuadrado, el más alto del que se tenga registro en el Caribe en un solo día.

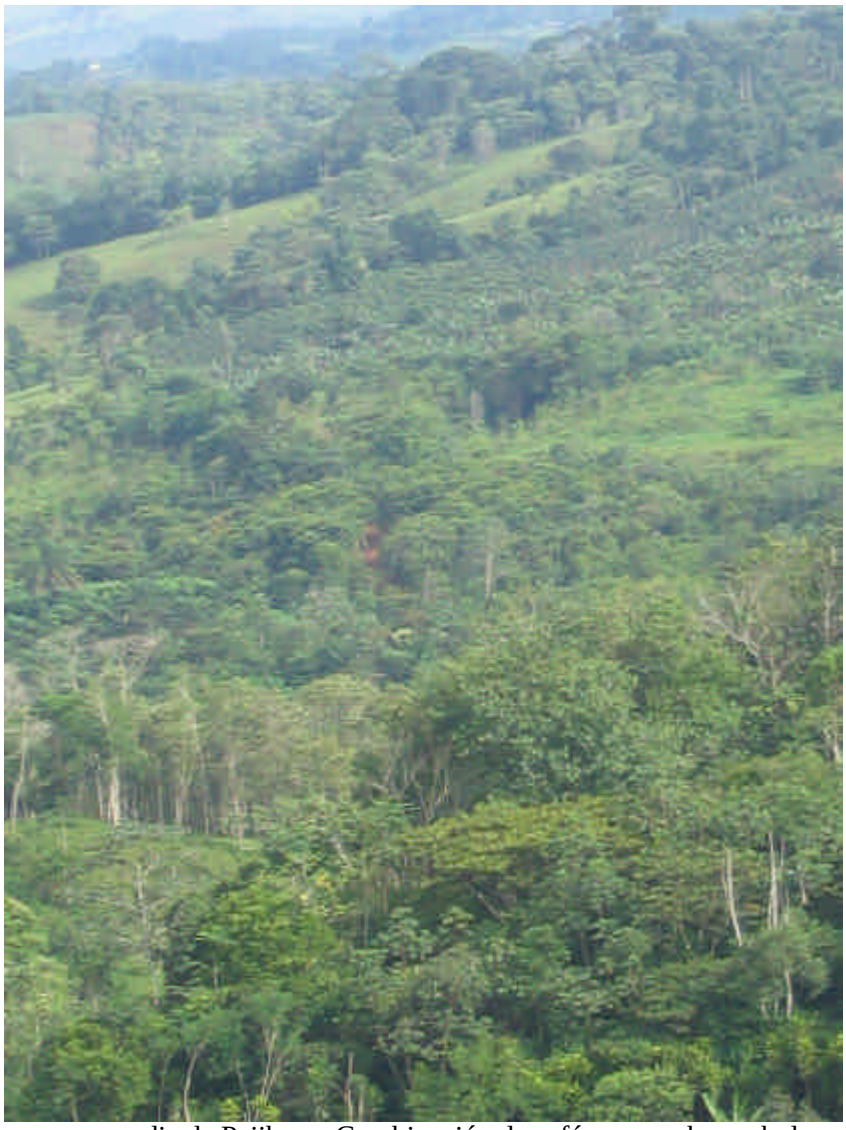
Anexo 3: Ubicación de la Región Niño 3.4 con respecto a Centro América



El Índice Oceánico del Niño (ONI, por sus siglas en Ingles), corresponde a medias móviles de 3 meses de las anomalías de Temperatura Superficial del Mar (SST, por sus siglas en Inglés) (ERSST v2 SST) en la región Niño 3.4 (5^0 N-5^0 S, 120^0 -170^0 W)

Anexo 4: La cuenca de Pejibaye en imágenes

Cultivo de café con sombra



Paisaje de la cuenca media de Pejibaye. Combinación de café con sombra, arboles en riberas de ríos y pastos.

A.

B.

A. Cultivo de café sin sombra. B. Bosque remanente en sección alta de la cuenca.

Los suelos de la cuenca son profundos, de textura moderamente fina a media y de poco a moderadamente permeables.

El manejo del café incluye podas, las cuales adicionan periódicamente materia orgánica al suelo.

Los pastos son el uso-cobertura dominante de la cuenca. Algunos de ellos muestran signos de erosion y deslizamientos superficiales.

Los cultivos anuales o en limpio cubren una porción muy reducida de la cunenca, sin embargo se ubican en terrenos de fuerte pendiente.

Nacimiento del río Platanares, afluente del Pejibaye.

Río Pejibaye, cuenca baja.

El mantenimiento inadecuado de algunos caminos de tierra y lastre son una fuente de escorrentía superficial y de sedimentos.