

EFFECTO DE LOS CAMBIOS GLOBALES SOBRE LA DINÁMICA DE DUNAS COSTERAS: EL CASO DE LOS MÉDANOS DE CORO

Dirk R. Thielen^{1}, José Isrrael Quintero¹, César A. Thielen²,
Nathaly Matute¹*

¹Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, IVIC, Centro de Ecología, Laboratorio de Productividad y Desarrollo Vegetal. ²Conestoga College, School of Engineering and Information Technology, Cambridge, Ontario, Canada.

*dthielen@ivic.gob.ve

RESUMEN

La dinámica espacial y temporal de las dunas del Parque Nacional Médanos de Coro pudiera explicarse a través de registros de cambios globales relativos al clima y al cambio del uso de la tierra. El objetivo se centró en identificar las posibles causas y consecuencias de la dinámica histórica de las dunas presentes en esta zona, a través del estudio de variables climáticas y de los aportes sedimentarios de las principales cuencas hidrográficas asociadas. Debido a que esta dinámica estaría influenciada por factores con manifestaciones tanto locales como externas, nos hemos centrado en áreas de observación que incluyeron, además de las dunas, aquellas de las cuencas hidrográficas que representan la fuente potencial de los sedimentos que originan sus arenas. La dinámica temporal fue evaluada a través del análisis de cobertura de la más amplia secuencia de imágenes disponibles, a saber: 1959-2007, y con la aplicación de técnicas como la clasificación supervisada, la detección de cambios, etc., propias de los sistemas de información geográfica. El estudio incluyó el análisis de variables climáticas como la precipitación (en las cuencas tributarias), y las relativas al viento (en la región de las dunas). Los resultados muestran que, a pesar de haber ocurrido un incremento teórico en el suministro de sedimentos a través de una intensificación en el uso de las cuencas tributarias y en condiciones de precipitación relativamente estables, la dinámica de las dunas fue temporalmente diferenciable resultando en una reducción significativa en su cobertura. Esta dinámica respondió a las características históricas de los vientos locales, cuyo potencial de arrastre de arenas (RDP=391) fue en promedio bajo, cercano al umbral donde ocurre estabilización de las dunas. Dependiendo de su efecto sobre la velocidad del viento, cambios climáticos futuros pueden resultar en la estabilización definitiva de estas dunas, o en su avance y afectación de áreas urbanas de la ciudad de Coro. La respuesta sería inmediata.

Palabras clave: cambios globales, cambios climáticos, cambios de uso de la tierra, dinámica de dunas, Médanos de Coro.

Effects of global changes on sand dune dynamics: Medanos of Coro as a study case

Abstract

The spatial and temporal dynamics of the dunes at Medanos of Coro National Park might be explained by global change records related to climate change and land use. The objective was to identify the possible causes and the consequences of historical dune dynamics present in this national park by considering climate variability, as well as sediment inputs from major associated watersheds. Because these dynamics could be influenced by local and external factors, we have focused our observations in different areas that included, in addition to the dune area, that of the watersheds that represent the potential source of sediments that originate the sand. The temporal

dynamics was evaluated by analyzing the broadest sequence of available image; in this study: 1959-2007. Techniques such as classification, change detection, and others, were applied by the use of geographical information systems. The study also included the analysis of climatic variables such as precipitation (in the tributary watersheds), and those relative to the wind dynamics (in the sand dune area). The results show that, despite a theoretical increase occurred in the supply of sludge through an intensified use of tributary basins and precipitation in relatively stable condition, the dynamics of the dunes were temporarily differentiable resulting in a significant reduction of coverage. This dynamic responded to the historical characteristics of the local winds, the sand drift potential (RDP = 391) was historically low, and close to the threshold where dune stabilization occurs. Depending on their effect on wind speed, future climate changes may result in permanent stabilization of these dunes, or in its progress and impact on urban areas of the city of Coro. This response would be rather fast.

Keywords: global changes, climate changes, land-use-changes, dune dynamics, Coro's sand dunes.

INTRODUCCIÓN

Dentro de la dinámica de los cambios globales se tiene la revalorización e intensificación en el uso de los espacios geográficos; esta presión de uso origina procesos que afectan la dinámica original del sistema ambiental. Aunado a esto, los cambios climáticos incorporan al sistema nuevas fuentes de variabilidad (IPCC, 2007). El escaso conocimiento de base sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas tropicales dificulta la comprensión y la posible predicción de sus respuestas frente a los cambios ambientales globales. En este sentido, la capacidad de reacción y planificación de una sociedad es directamente proporcional al conocimiento que tiene sobre la evolución histórica, situación actual y posibles escenarios futuros de cambio del sistema del cual depende.

El cambio en el uso de la tierra es la modificación antrópica del ambiente natural en ambiente intervenido como campos de cultivo, pasturas, asentamientos urbanos. El principal uso de la tierra es la producción agropecuaria (IPCC, 2000; 2007). En las últimas décadas se produjeron cambios paulatinos en el uso de la tierra, incrementándose fuertemente el ritmo de cambio. Esta intensificación productiva tiene consecuencias ambientales. Puede tener un impacto en el albedo de la superficie, la evapotranspiración, las fuentes y los sumideros de gases de efecto invernadero, u otras propiedades del sistema climático y por lo tanto puede tener un forzamiento radiativo y/u otros impactos sobre el clima, a nivel local o global. La intensificación en el uso de la tierra puede acelerar los procesos erosivos, incrementando sensiblemente el aporte de sedimentos al mar por parte de las cuencas hidrográficas (IPCC, 2000).

Las dunas del Istmo de los Médanos son el caso más concreto de morfología eólica en Venezuela y están comprendidos en una de las formaciones desérticas más extensa del país (González de Juana *y col.*,

1980). Tal como se afirma en los tratados de geomorfología clásica, la dinámica espacial y temporal de las dunas obedece principalmente a los cambios ambientales, en el sentido de velocidad del viento y cantidad de arena (sedimentos) disponible.

Según Camacho *y col.* (2011), las dunas costeras del Parque Nacional Médanos de Coro (PNMC) se originaron probablemente por una conjunción de factores como: disponibilidad de sedimentos en una amplia llanura costera relacionada con un nivel marino regresivo, vientos fuertes y persistentes, orientación oblicua de la costa respecto a la dirección del viento, una topografía continental favorable adyacente a la playa, bajo condiciones climáticas distintas a las actuales. Estos autores sostienen que el origen de las dunas responde a condiciones paleogeográficas que se extienden desde hace unos 12000 años hasta alcanzar la configuración actual, aproximadamente 4000 años antes del presente, cuando quedó expuesto el istmo como consecuencia del levantamiento tectónico. Ahora bien, Tamayo (1941) sostiene que la invasión de las arenas no es cosa remota. Hay evidencias que sugieren que el movimiento masivo de arena se deriva en parte de la deforestación de zonas costeras durante la época colonial. Morón (2011) respalda esta observación argumentando la presencia de afloramientos cerámicos, cementerio indígena, concheros y estructuras de tierra apisonada en el área que ocupan actualmente las dunas, y que datan entre 1410 y 1830 (Petit, 1970).

Camacho *y col.* (2011) sugirieron que las arenas de las dunas del PNMC provienen de sedimentos de origen terrígeno y escasa distancia de transporte hasta el lugar de acumulación. Las corrientes marinas arrastran la arena (sedimentos) de las diferentes cuencas hidrográficas (eg. Río Tocuyo, Río Ricoa, Río Hueque). Los cambios en la cobertura y en los usos de la tierra en estas cuencas han exacerbado los procesos erosivos y por ende la cantidad de sedimentos disponibles para que las olas y los vientos dominantes los depositen en las playas y sean arrastrados tierra adentro. Por efecto de las corrientes marinas y los vientos, los sedimentos de determinadas cuencas pueden ser reposicionados en las costas. Rodríguez-Olarte *y col.* (2007) realizaron una caracterización de la cuenca del río Tocuyo y determinaron que la influencia de la intervención humana sobre el medio fluvial es evidente y que la cantidad de sedimentos descargados al mar por procesos de erosión se ha incrementado sensiblemente en los últimos 50 años.

Las dunas de arena de las regiones semi-áridas y áridas se consideran ecosistemas sensibles que pueden verse afectados por perturbaciones externas (Seifan, 2009). El desarrollo de campos de dunas eólicas en ambientes costeros y semiáridos es una función de complejas interacciones ecogeomorfológicas siendo sensibles a las fluctuaciones de las condiciones climáticas y ambientales (Nield y Baas, 2008). Zenkovich (1967) y Fryberger y Dean (1979) señalaron que la

formación y permanencia de dunas activas en un borde costero requiere de una fuente proveedora de suficiente arena y un viento de cierta fuerza y constancia con dirección tierra adentro. De acuerdo con Goldsmith (1985), las dunas se producen donde existe un aporte suficiente de arena, viento para movilizarla y un lugar donde acumularse; por estas razones, la zona costera es un lugar ideal para el desarrollo de este modelado ya que la deriva litoral provee la arena y el oleaje la acumula en la playa. Ahora bien, según Rognon (1982), las dunas son sensibles a modificaciones en los parámetros atmosféricos, tales como dirección e intensidad del viento y cambios en la precipitación, que afectan la evapotranspiración, la humedad del suelo, el porcentaje de vegetación y la movilidad de las partículas. Las áreas de dunas tienden a acentuar los efectos de las fases secas y húmedas y responden rápidamente a los cambios climáticos (Tsoar, 2005; Roskin *y col.*, 2011; Ashkenazy *y col.*, 2012).

Relacionar la historia de las diferentes variables climáticas, tanto las que hayan podido afectar la dinámica sedimentaria de las cuencas hidrográficas (a partir de datos de estaciones meteorológicas continentales), así como las que afecten la deposición de dichos sedimentos en dunas costeras (a partir de datos de estaciones meteorológicas litorales), con estudios de los cambios en la cobertura y en el uso de la tierra, debe arrojar importantes evidencias sobre la presión a la que está sometida una importante región de nuestra geografía y del Caribe.

Nos trazamos como objetivo identificar las posibles causas y consecuencias de la dinámica histórica de las dunas presentes en el Parque Nacional Médanos de Coro, a través del estudio de variables climáticas y de los aportes sedimentarios de las principales cuencas hidrográficas asociadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Debido a que la dinámica espacio-temporal de las dunas presentes en el PNMC (estado Falcón, Venezuela) puede estar influenciada por factores tanto locales como externos, nos hemos concentrado en un área de observación que contuvo, además de las dunas, aquellas de las cuencas hidrográficas que pudieran estarlo afectando. Las áreas de estudio se pueden resumir según las Figuras 1 y 2.

La dinámica temporal fue evaluada a través de la interpretación de la más amplia secuencia de imágenes disponibles del entorno inmediato al sistema así como de las áreas con influencia potencial. El análisis espacial consideró las respuestas del sistema a la dinámica de las variables y determinantes identificando la(s) escala(s) a la cual participan. La combinación del conocimiento de las respuestas a estas dos escalas

hizo posible la modelización predictiva de los escenarios ante la inercia actual del sistema así como de las presiones ocasionadas por cambios globales futuros, cumpliendo con el objetivo de definir las estrategias ajustadas a la realidad y acordes a las tendencias.

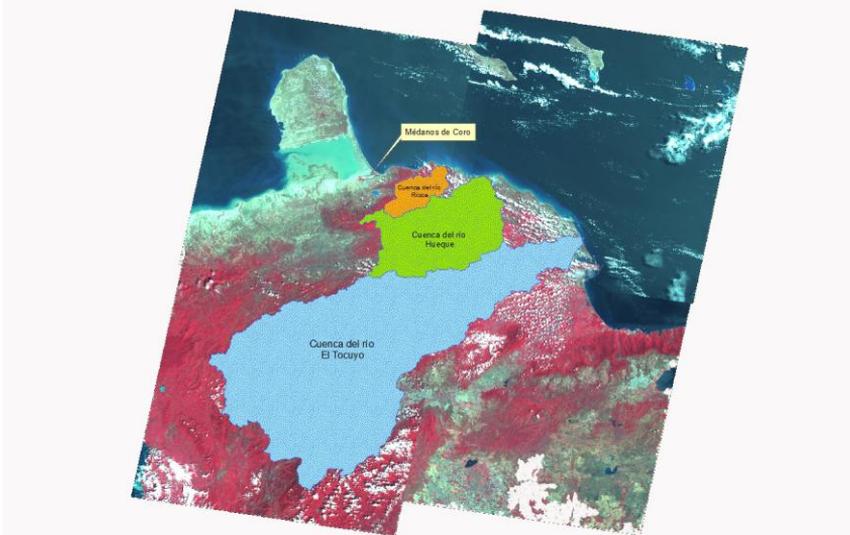


Figura 1. Ubicación relativa al PNMC de las cuencas hidrográficas de los ríos Tocuyo (1.767.591 ha), Hueque (418.956 ha) y Ricoa (81.821 ha). Imagen base: mosaico LandSat del año 2000.



Figura 2. Ubicación relativa al PNMC de las áreas donde se realizó el análisis espacial con los Sensores Remotos (aerofotografías e imágenes satelitales). Área Grande \approx 60.000 ha, Área Media \approx 7.000 ha y Área Pequeña \approx 1.350 ha. Imagen base: SPOT del año 2007.

Se utilizaron todas aquellas imágenes de diferentes sensores disponibles para las áreas arriba descritas, a saber: aerofotografías del IGVSB-MppAmb, imágenes LandSat facilitadas por la Universidad de Maryland, disponibles en línea por la dirección web <ftp://ftp.glcf.umiacs.umd.edu/glcf/Landsat/>, e imágenes SPOT 5 facilitadas por el CPDI del FII-MppCTI. La serie de tiempo resultante es de 49 años: la primera imagen disponible es de 1959 y la última es de 2007. La Tabla 1 resume las especificaciones técnicas de estos sensores. Los SIG utilizados fueron tanto libres como propietarios, a saber: ArcGIS, ArcView, Erdas, MultiSpec e Ilwis.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los sensores remotos disponibles.

Sensor Remoto	Especificaciones
Aerofotografías	1959: 1 imagen de la misión M020106 a la escala 1:25.000 1964: 1 imagen de la misión M020128 a la escala 1:22.000 1982: 1 imagen de la misión M0201144 a la escala 1:20.000
Satelital	1990: 4 imágenes LandSat: p005r052, p005r053, p006r052 y p006r053, resolución espectral 7 bandas, resolución del pixel 28,5 m 2000: 4 imágenes LandSat: p005r052, p005r053, p006r052 y p006r053, resolución espectral 7 bandas, resolución del pixel 28,5 m 2007: 2 imágenes SPOT 5: p652r327, resolución espectral 4 bandas, resolución del pixel 5 y 10 m

Las series de imágenes empleadas en los análisis de cobertura resultaron como sigue:

Para el Área Pequeña: aerofotografías 1959, 1964 y 1982; así como SPOT 5, pancromático.

Para el Área Mediana: imágenes LandSat de 1990 y 2000; así como SPOT 5, multiespectral.

Para el Área Grande: imágenes LandSat de 1990 y 2000; así como SPOT 5, multiespectral.

Para las cuencas hidrográficas: imágenes LandSat (en mosaicos) para 1990 y 2000.

Para minimizar las fuentes de error y facilitar la comparación y análisis de las imágenes se llevaron a una misma:

Resolución espacial (mismo tamaño de pixel, ortorectificadas, misma proyección), mínima cobertura de nubes).

Resolución espectral (en las satelitales, misma combinación de bandas 4-3-2, por ejemplo).

Resolución temporal (misma época del año, ≈10 años entre imágenes secuenciales).

Sobre las diferentes imágenes, para las distintas áreas, se aplicaron las técnicas comúnmente empleadas en SIG, a saber:

Clasificación Supervisada, Clasificación No-supervisada, Aplicación de Filtros y Detección de Cambios.

Para el análisis de las variables climáticas se dispuso de datos pluviométricos anuales para 96 estaciones meteorológicas distribuidas en las diferentes áreas consideradas en este estudio (Figura 3).

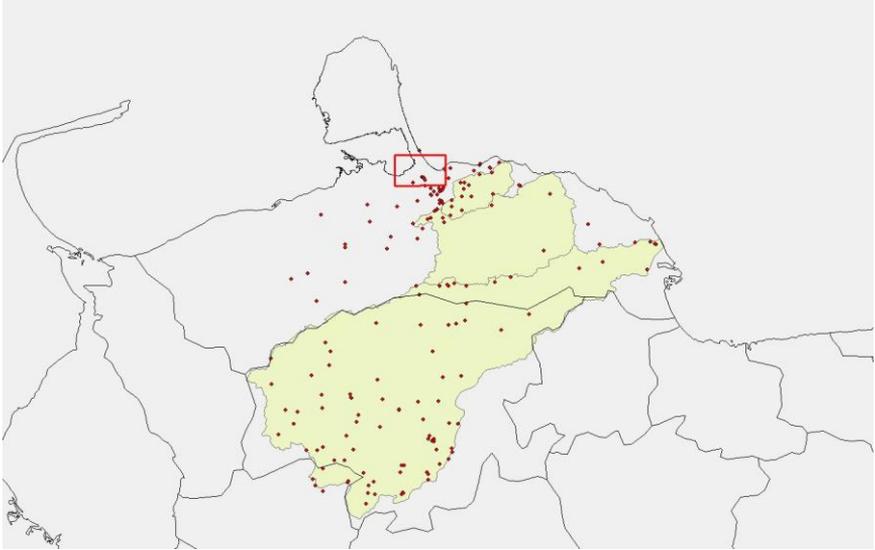


Figura 3. Distribución espacial de las diferentes estaciones climáticas de las cuales se dispuso de datos de precipitaciones para su análisis.

En adición, se dispuso de datos base anual sobre velocidad y dirección de vientos (parámetros meteorológicos que afectan directamente la dinámica de las dunas) para la estación más próxima al PNM, en este caso es la que sirve al aeropuerto de la ciudad de Coro (serial 804030), a 2,7km de las dunas más próximas. Los datos fueron provistos por NCDC-NOAA (<http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>). En principio, se hicieron los análisis climáticos a través de correlaciones de series de tiempo y estudio de las anomalías climáticas. En el caso del análisis temporal de la dinámica de los vientos, se incluyó la metodología recomendada por Fryberger y Dean (1979) y Tsoar (2005) sobre el Potencial de Arrastre (DP, Drift Potential) resultante sobre las dunas en respuesta a la velocidad y dirección anual histórica de los vientos:

$$DP = \sum q = \frac{U^2(U - U_t)}{100} t$$

donde, U es la velocidad del viento (en nudos), U_t es la velocidad del viento umbral (=12 nudos) y t es el tiempo durante el cual el viento a soplado por encima de dicho umbral. La división entre 100 se efectúa para reducir el resultado a un valor más pequeño. Al calcularse esto separadamente para cada dirección principal del viento (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW) se obtienen los resultados de DPs como vectores unitarios. A partir de estos DPs se estima el vector resultante llamado Potencial de Arrastre Resultante (RDP, Resulting Drift Potential). El índice de variabilidad direccional de los vientos se obtiene de la relación RDP/DP, donde valores próximos a uno señalan un alto grado de unidireccionalidad. También a partir de las relaciones entre DP y RDP/DP se obtiene el Índice de Movilidad de Arenas (M, Sand Mobility Index):

$$M = \frac{DP}{1000 - (750 \frac{RDP}{DP})}$$

RESULTADOS

Según la metodología aplicada a las imágenes señaladas en la Tabla 1, se tienen los resultados obtenidos de la clasificación realizada a las 1.350 ha (Área Pequeña) donde la extensión de las dunas osciló entre 37% y el 49%. Se pudo establecer que la distancia total recorrida por las dunas fue de aproximadamente 640 m en los 55 años de la serie, con muy poca variación en la dirección de su desplazamiento (Figura 4).

Se tiene una dinámica temporalmente diferenciable donde, entre 1959 y 1964, el desplazamiento promedio fue de 28m/año, entre 1965 y 1982 fue algo menos de la mitad de esa cifra (13m/año), y entre 1983 y 2007 se redujo hasta apenas 10m/año - un tercio del original.

Los resultados del análisis de cobertura de las 7.000 ha correspondiente al Área Mediana, donde están comprendidas las dunas del PNMC, señalan que la dinámica más importante viene dada por una reducción de más del 66% en la extensión de las dunas entre 1990 y 2000. A una escala menor, la dinámica de la cobertura de las 60.000 ha del Área Grande es explicada por un incremento sostenido de los suelos desnudos entre 1990 y 2007.

El área de las cuencas hidrográficas fue definida como aquella donde las cuencas de los principales ríos (Tocuyo, Hueque y Ricoa), tributarios potenciales de sedimentos que contribuyen con la deposición de arenas de las dunas del PNMC, se expresan. Del mosaico de imágenes LandSat para 1990 y 2000 se estableció que el área que comprende las cuencas es algo menor a los 21.000 km². De la clasificación no-supervisada de las imágenes de 1990 y 2000, resultaron 7 clases de cobertura principales.

Su identificación con las imágenes y con la experiencia de campo se les puede asociar a las siguientes coberturas: Agua (embalses), Bosque, Cultivos, Ladera con vegetación, Ladera desnuda, Suelo labrado y Suelo desnudo. La Tabla 2 resume los datos resultantes de las clasificaciones.

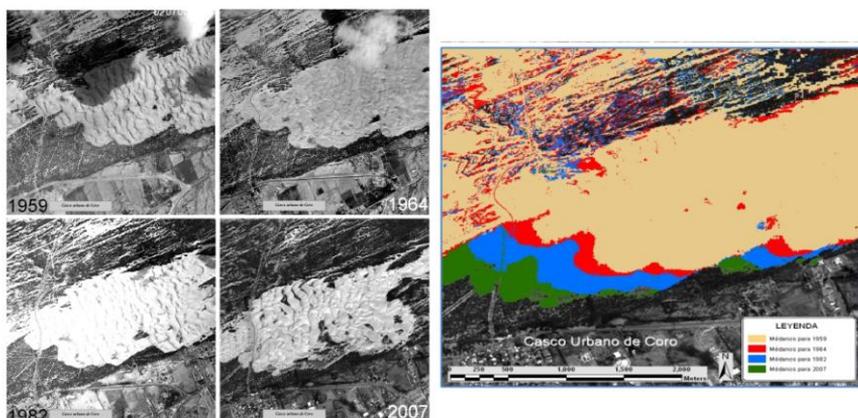


Figura 4. Ubicación de las dunas del PNMC en relación al casco urbano de la ciudad de Coro para los años 1959, 1964, 1982 y 2007; y representación de la dinámica resultante.

Tabla 2. Coberturas resultantes de la clasificación de los 21.000 km² del área de las cuencas hidrográficas de los ríos Tocuyo, Hueque y Ricoa, tributarios potenciales de sedimentos que contribuyen con la seposición de arenas de las dunas del PNMC.

Clases de cobertura	1990		2000	
	Área (ha)	Porcentaje	Área (ha)	Porcentaje
Agua	6.920,69	0,33	4.878,86	0,24
Bosque	545.792,77	26,00	370.282,68	18,53
Cultivos	550.836,60	26,24	709.507,28	35,50
Ladera con vegetación	532.651,38	25,37	482.602,24	24,15
Ladera desnuda	298.522,91	14,22	228.330,54	11,42
Suelo desnudo	74.197,49	3,53	17.185,34	0,86
Suelo labrado	90.385,23	4,31	185.769,37	9,30
	2.099.307,07	100,00	1.998.556,31	100,00

Se tiene que, para los 10 años comprendidos entre 1990 y 2000, ocurre un importante incremento en el grado de intervención humana en el área que ocupan las cuencas. Las clases de cobertura de origen antrópico (Cultivos y Suelo labrado) sufrieron un incremento mientras que las coberturas de sistemas naturales (Bosque y Laderas con vegetación) presentaron una reducción en la extensión de sus coberturas.

En relación a las variables climáticas de las principales cuencas hidrográficas asociadas, el análisis de los valores anuales medios de las 96 estaciones meteorológicas consideradas (Figura 3) muestra que, entre 1959 y 1997, el régimen anual de precipitaciones presenta dos máximos: uno en mayo y otro luego en octubre. Corresponde entonces a un régimen tetraestacional de precipitaciones: dos estaciones secas y dos estaciones húmedas. En los 39 años de esta serie analizada se tienen que el año más lluvioso fue 1981 con 1201 mm y el más seco fue 1983 con 514 mm. Del análisis de las anomalías de precipitación se observa una variabilidad temporal en las precipitaciones que, en líneas generales, tiende a una leve disminución de las mismas entre 1959 y 1997. Esta variabilidad se manifiesta a través de un lapso seco de 1959 a 1968, seguido por un incremento altamente variable en las precipitaciones medias anuales desde 1969 hasta 1990. Los 7 años comprendidos entre 1990 y 1997 tienden a ser secos. En la Figura 5, que expresa la suma acumulada de las desviaciones interanuales de la media, se evidencia mejor esta variabilidad temporal.

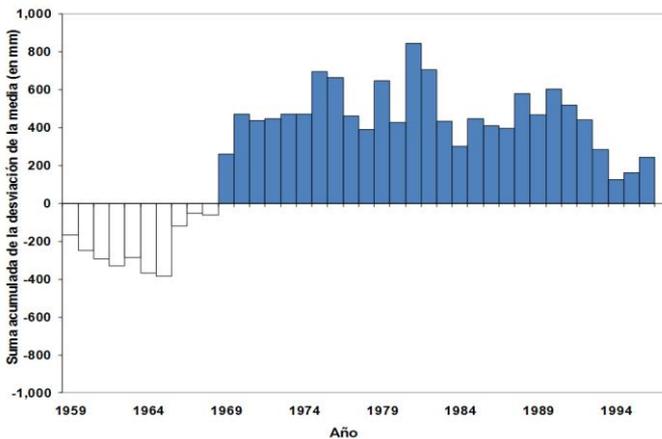


Figura 5. Distribución interanual de la suma acumulada de las desviaciones del valor medio de las precipitaciones en el área de las cuencas de los ríos tributarios potenciales de sedimentos que contribuyen con la deposición de arenas de las dunas del PNMC.

Del análisis de las precipitaciones anuales en la estación meteorológica que sirve al aeropuerto de la ciudad de Coro (serial 804030), a 2,7 km de las dunas más próximas, se observa que, para el período 1959-2004, el régimen de precipitaciones es más seco que aquel de las cuencas tributarias. Y si bien tiende a tener un régimen tetraestacional, es en el último trimestre del año (octubre-diciembre) cuando ocurre el mayor aporte de las precipitaciones anuales. Al considerar las variaciones interanuales ocurridas entre 1959 y 2004 se

tienen que el año más lluvioso fue 1999 con 854 mm y el más seco fue 2001 con 154 mm. Se aprecia también la alternancia de años con precipitaciones relativamente más abundantes. Se observa una variabilidad temporal en las precipitaciones que, en líneas generales, no presenta una tendencia definida ni a un incremento ni a una disminución en las precipitaciones (Figura 6). Los años con valores de precipitación por encima de la media, insertan variabilidad al sistema seco que predomina en la zona de las dunas del PNMC, sin crear una tendencia significativa a una condición más seca o húmeda.

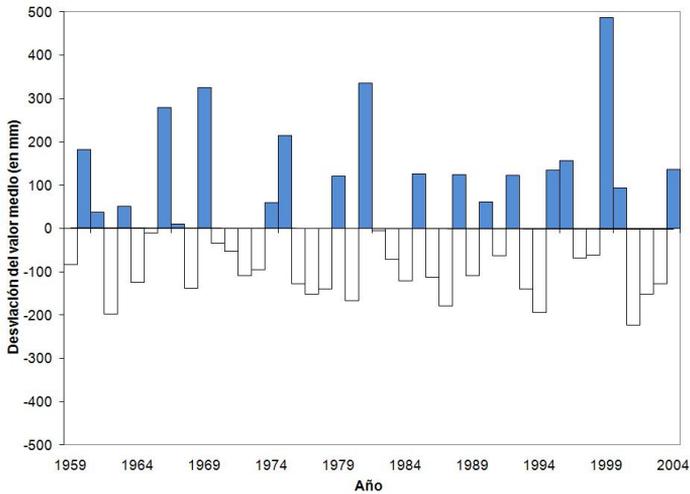


Figura 6. Distribución interanual de las desviaciones del valor medio de las precipitaciones anuales para la estación meteorológica que sirve al aeropuerto de la ciudad de Coro (serial 804030), a 2,7km de las dunas del PNMC.

En relación al análisis de la dinámica temporal de los vientos en el PNMC, los datos disponibles permitieron el análisis para una amplia serie: 1959-2013. El análisis de la velocidad media anual de los vientos señala una dinámica temporal muy importante. Presentándose un valor máximo en 1961 cercano a los 30km/h (15,4 nudos) y un valor mínimo en 1988 de 13km/h (7,3 nudos) (Figura 7).

La Figura 8 muestra la distribución interanual de la suma acumulada de las desviaciones del valor medio de la velocidad de los vientos. Se confirma la condición de elevada variabilidad temporal que caracteriza la zona para el período entre 1959 y 2013 en términos de velocidad media anual de los vientos.

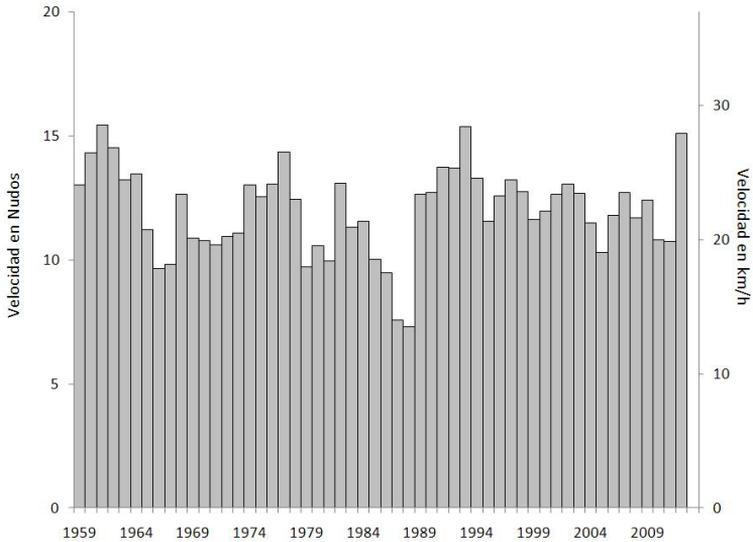


Figura 7. Distribución interanual de la velocidad media anual de los vientos para la estación meteorológica que sirve al aeropuerto de la ciudad de Coro (serial 804030), a 2,7km de las dunas del PNMC.

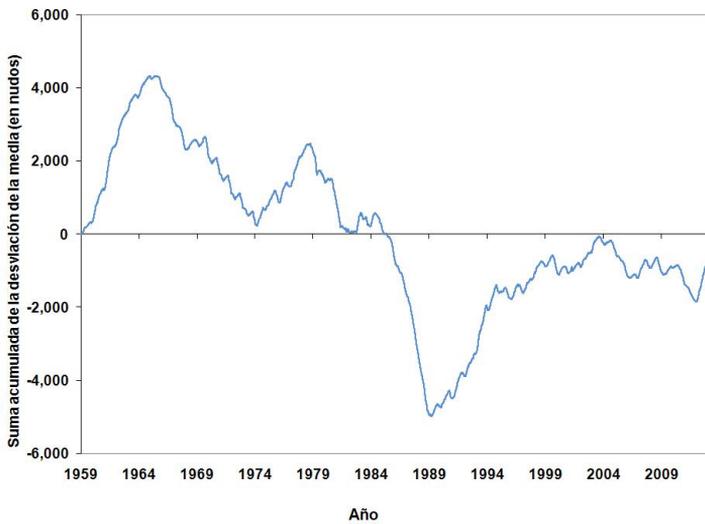


Figura 8. Distribución interanual de la suma acumulada de las desviaciones del valor medio de la velocidad de los vientos para la estación meteorológica que sirve al aeropuerto de la ciudad de Coro (serial 804030), a 2,7km de las dunas del PNMC.

Ahora bien, al tratarse el viento de un fenómeno meteorológico que, además de presentar una magnitud, se manifiesta en una dirección, el análisis de la dinámica temporal del DP, RDP y M, permite el análisis integral de la dinámica temporal del viento en consideración a estos parámetros. De la Tabla 3 se tiene que el DP (Potencial de Arrastre) promedio de los vientos en el área de las dunas entre 1959 y 2013 es de 392, para un RDP (Potencial de Arrastre Resultante) de 354 de dirección *Este*. La relación RDP/DP resultante es de 0,9032, valor que confirma una elevada direccionalidad histórica del *Este* de los vientos. El Índice de Movilidad de Arenas (M) es de 1,2, donde el 54,5% de los 55 años de la serie su valor fue superior a uno. El lapso 1959-1964 presentó los valores más elevados para estos, mientras que la menor dinámica dentro de la serie se tiene entre 1965 y 1982.

Tabla 3. Dinámica temporal del DP (Potencial de Arrastre), RDP (Potencial de Arrastre Resultante) y M (Índice de Movilidad de Arenas) que resultan del análisis de la velocidad y dirección de los vientos para la estación meteorológica que sirve de que sirve de aeropuerto de la ciudad de Coro (serial 804030) a 2,7 km de las dunas del PNM.

	1959-1964	1965-1982	1983-2007	2008-2013	1959-2013
DP	650	325	365	453	392
RDP	610	287	328	412	354
RDP/DP	0,9382	0,8815	0,9008	0,9090	0,9032
M	2,2	1,0	1,1	1,4	1,2
N° años donde M>1	6	8	14	2	30
N° Años de la serie	6	18	25	6	55
% años con M>1	100,0	44,4	56,0	33,3	54,5

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El estado de conservación de las cuencas hidrográficas de los ríos Tocuyo, Hueque y Ricoa, tributarias de sedimentos de las dunas del PNM, ha sido importantemente afectado por las actividades de origen antrópico. Los cambios en la dinámica histórica de las precipitaciones observados en el área de las cuencas tributarias, bien a periodos secos o húmedos, pueden afectar la estabilidad y desarrollo de las actividades agrícolas presentes, lo que a su vez pudiera exacerbar los procesos erosivos y la cantidad de sedimentos que se originarán de las cuencas, situación que debe servir de alerta a las autoridades a implementar prácticas de manejo y agrícolas en estas cuencas que redunden en la adaptación a estas condiciones climáticas, así como en una reducción de los procesos erosivos.

Si bien lo anterior confirma lo expuesto por Rodríguez-Olarte *y col.* (2007), así como por Cartaya *y col.* (2005) y Camacho *y col.* (2011), sobre un incremento de sedimentos descargados al mar por procesos erosivos

antropogénicos, al considerar la dinámica espacio-temporal de las dunas del PNMC, no se logra identificar una relación directamente proporcional entre la disponibilidad de sedimentos precursores de arena y la extensión de dunas. Esto es: dentro de los procesos de los Cambios Globales, los efectos de cambios en el uso de la tierra registrados desde 1990 no han podido ser detectados a través del análisis de la dinámica espacio-temporal de las dunas del PNMC.

Los resultados muestran que, si bien existe una tendencia a un avance de las dunas sobre el casco urbano de la ciudad de Coro, ha ocurrido una merma histórica en la cantidad (cobertura) de arena que expresa este fenómeno. Evidencias de esta dinámica también han sido reportadas para otras localidades (Janke, 2002). A pesar de esta tendencia, por su proximidad a la ciudad de Coro, la afectación a las áreas urbanas podría ocurrir más por las dunas que se encuentran ya próximas al casco urbano, que por deposición y formación de nuevas dunas a partir de un incremento en los aportes de los sedimentos de las cuencas tributarias. Morón (2011) sostiene que el avance de las dunas sobre el casco urbano de la ciudad de Coro se encuentra contenido por una barrera vegetal constituida básicamente por *Prosopis juliflora*, *Cercidium praecox*, *Croton rhamnifolius* y algunas cactáceas. Según el autor, esta barrera natural debe su existencia a la circunstancia siguiente: los llanos que rodean a Coro desaguan hacia el Norte donde éstas represan las aguas permitiendo una lenta y persistente infiltración bajo los montículos de arena contiguos, lo cual mantiene la humedad necesaria a la vida de las plantas que operan como barrera. Sin embargo, la importante dinámica temporal observada en el avance de las dunas del PNMC (1959-1964: 28m/año, 1965-1982: 13m/año, y 1983-2007: 10m/año), y la proximidad resultante de las dunas al casco urbano de Coro, ratifica la importancia en la identificación de las causas y de sus efectos.

Entre otros trabajos que así lo confirman, los de Fryberger y Dean (1979) y Tsoar (2005), señalaron a la dinámica histórica de los vientos como la responsable climática directa de aquella de las dunas; con efectos aún más pronunciados que aquellos que puedan devenir de un cambio en las precipitaciones. La dinámica de las dunas se explica por propiedades del viento como son su intensidad y direccionalidad. Sobre los vientos en el área de estudio, Quintero y Terejova (2008) se refirieron a estas variables como de las más constantes del globo. En el presente estudio, el avance de las dunas y su extensión, se puede explicar a través de los resultados que se obtuvieron para las variables DP, RDP/DP y M, a saber: el mayor avance y extensión de dunas observado entre 1959 y 1964 responde a condiciones del viento donde el Potencial de Arrastre (DP=650), la direccionalidad (RDP/DP=0,9382) e Índice de Movilidad de Arenas (M=2,2) alcanzó máximos valores. Los valores para las series restantes, 1965-1982 y 1983-2007, si bien conservan valores

de direccionalidad aún elevados (0,8815 y 0,9005, respectivamente), el Potencial de Arrastre de sus vientos es significativamente inferior (325 y 365), así como su Índice de Movilidad de Arenas (1,0 y 1,1).

Ahora bien, según Tsoar (2005), el valor de $DP=392$ obtenido en este estudio del análisis de la serie 1959-2013, como bajos y cercanos al umbral donde ocurre la estabilización de las dunas. Más aún, el mismo autor hace referencia que, para dunas presentes en regiones donde las precipitaciones medias anuales sean $>50\text{mm}$, estas se mantendrán móviles y desprovistas de vegetación siempre y cuando $M > 1$. El valor de $M=1,2$ también se aproxima a este umbral.

Dependiendo de su efecto sobre la velocidad del viento, cambios climáticos futuros pueden resultar en la estabilización definitiva de estas dunas, o en su avance y afectación de áreas urbanas de la ciudad de Coro. La experiencia del presente estudio, respaldada por evidencias de Tsoar *y col.* (2009), señalaron que la respuesta en la dinámica de las dunas sería inmediata.

Camacho *y col.* (2011) indicaron que la existencia simultánea de dunas transversales activas y dunas longitudinales estabilizadas en un área relativamente pequeña, como es el Istmo de Médanos, puede estar relacionada con condiciones paleoclimáticas, la configuración y el relieve de la costa. Discuten sobre el efecto de sombra en la disminución local de la velocidad del viento por la presencia del cerro Pelón localizado al este de las dunas, condicionando la formación y presencia de dunas transversales activas. La elevada dinámica espacial de las dunas evidenciada en el presente estudio advierte sobre la capacidad de la respuesta de éstas a eventos temporalmente más dinámicos. En atención a recomendaciones de Andreotti *y col.* (2002), Schwämmle y Herrmann (2003), y Derickson *y col.* (2008), nuestro equipo elabora actualmente un estudio, sobre la base de una serie de imágenes de mayor resolución temporal, que logre la identificación de respuestas diferenciables entre las diferentes morfologías de dunas (ie. longitudinales *vs.* transversales).

En el presente estudio no fue considerada la dinámica histórica de las corrientes marinas y sus posibles efectos sobre la deposición de arenas disponibles para la expresión de la dinámica de las dunas presentes en el Parque Nacional Médanos de Coro. Sin embargo, ha llamado nuestra atención en las imágenes de satélite las plumas de sedimentos suspendidos y la aparición en la década de los 70, de dos importantes muelles próximos en la línea de costa (en Muaco, $11,49^\circ$ y $-69,55^\circ$; y en Puerto Cumarebo, $11,51^\circ$ y $-69,33^\circ$); y que pudieran haber alterado de alguna manera el flujo y deposición de sedimentos. Alteraciones de otro origen en las corrientes marinas también pudieran haber ocurrido. Esto aún debe estudiarse.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo contó con el valioso apoyo de José San José y Rubén Montes, personal científico del Laboratorio de Productividad y Desarrollo Vegetal (LPyDV) del Centro de Ecología del IVIC; así como con los valiosos aportes y comentarios de Grisel Velásquez, de la Unidad de Sistemas de Información Geográfica (UniSIG) e Izabela Stachowicz, Profesional en Entrenamiento del LPyDV.

LITERATURA CITADA

- Andreotti, B., P. Claudin y S. Douady. 2002. Selection of dune shapes and velocities Part 1: Dynamics of sand, wind and barchans. *Eur. Phys. J. B* 28:321-339.
- Ashkenazy, Y., H. Yizhaq y H. Tsoar. 2012. Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts. *Climatic Change* 112:901-923.
- Camacho, R., S. Salazar, L. González, H. Pacheco y C. Suárez. 2011. Caracterización geomorfológica de las dunas longitudinales del Istmo de Médanos, estado Falcón, Venezuela. Investigaciones Geográficas. *Boletín del Instituto de Geografía UNAM* 76:7-19.
- Cartaya, S., W. Méndez y L. Gonzalez. 2005. Geomorfología y sedimentología de los ambientes depositacionales recientes del complejo estuarino de los ríos Hueque y Curarí, Estado Falcón, Venezuela. Investigaciones Geográficas, *Boletín del Instituto de Geografía UNAM* 58:7-33.
- Derickson, D., G. Kocurek, R.C. Ewing y C. Bristow. 2008. Origin of a complex and spatially diverse dune-field pattern, Algodones, southeastern California. *Geomorphology* 99:186-204.
- Fryberger, S. y G. Dean. 1979. Dune forms and wind regime. En: *A Study of Global Sand Seas* (E.D. McKee, Ed.), Geological Survey Professional Paper 1052, pp.137-169.
- Goldsmith, V. 1985. Coastal dunes. En: *Coastal Sedimentary Environments* (R.A. Davis, Ed.) 2nd edn, Springer Verlag, New York. Pp. 171-236.
- González de Juana, C., J.M. Iturralde de Arozena y X. Picard Cadillat. 1980. *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. 2 tomos, ed. Foninves, Caracas, 1031 pp.
- IPCC. 2000. Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (R.T. Watson y col., Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 377 pp.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds.) Cambridge University Press, Cambridge, 996 pp.
- Janke, J.R. 2002. An analysis of the current stability of the Dune Field at Great Sand Dunes National Monument using temporal TM imagery (1984-1998). *Remote Sens. Environ.* 83:488-497.
- Morón, C. 2011. Presencias bajo la arena: yacimientos arqueológicos en el Parque Nacional Médanos de Coro. *Boletín Antropológico* 29(81):7-26.
- Nield, J.M. y A.C.W. Baas. 2008. The influence of different environmental and climatic conditions on vegetated aeolian dune landscape development and

- response. *Global Planet. Change* 64:76-92.
- Petit, O.R. 1970. Cementerio Indígena. Descubrimiento del Cementerio de los Indios Caquetíos, Ascendientes del Gran Cacique Manaure. En: Rafael Sánchez: Curiana. Coro, Edición facsimil, Instituto de Cultura del Estado Falcón, (INCUDEF), Coro.
- Rodríguez-Olarte, D., L. Romero, J. Coronel y A. Amaro. 2007. Caracterización preliminar de los ambientes fluviales en la cuenca del río Tocuyo, vertiente del Caribe, Venezuela. *Memoria de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales* 166:59-79.
- Rognon, P. 1982. Pluvial and arid phases in the Sahara: the role of nonclimatic factors. En: *Palaeoecology of Africa*. Sarntheim, M., E. Seibold y P. Rognon, (Eds.), Routledge, Rotterdam. Pp. 45-62.
- Roskin, J., N. Porat, H. Tsoar, D. Blumberg y A. Zander. 2011. Age, origin and climatic controls on vegetated linear dunes in the northwestern Negev Desert (Israel). *Quaternary Sci. Rev.* 30:1649-1674.
- Seifan, M. 2009. Long-term effects of anthropogenic activities on semi-arid sand dunes. *J. Arid Environ.* 73:332-337
- Schwämmle, V. y H.J. Herrmann. 2003. Solitary wave behaviour of sand dunes. *Nature* 426:619.
- Tamayo, F. 1941. Exploraciones botánicas en la Península de Paraguaná, estado Falcón. *Bol. Soc. Venez. Cienc. Nat.* 47:1-78.
- Tsoar, H. 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Physica A* 357:50-56.
- Tsoar, H., N. Levin, N. Porat, L.P. Maia, H.J. Herrmann, S.H. Tatumi y V. Claudino-Sales. 2009. The effect of climate change on the mobility and stability of coastal sand dunes in Ceará State (NE Brazil). *Quaternary Res.* 71:217-226.
- Zenkovich, V. 1967. *Processes of Coastal Development*. Edinburgh, Scotland, 738 pp.