



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

**REVISTA CIENTÍFICA de las  
FUENTES RENOVABLES de ENERGÍA**

**32**



|  |           |
|--|-----------|
| <b>Medio ambiente, desarrollo sostenible y políticas energéticas,<br/>con una perspectiva socialista desde América Latina y el Caribe.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>Elaboración de mapas de distribución de la energía<br/>de las olas, y su aprovechamiento como fuente renovable .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>Resultados preliminares del estudio del viento con fines<br/>energéticos, a partir de la información proveniente de la red<br/>de torres meteorológicas de referencia para el programa eólico .....</b> | <b>25</b> |
| <b>Sistemas de información geográfica y su aplicación<br/>en los proyectos de electrificación rural .....</b>  | <b>42</b> |
| <b>Fortalecimiento del sistema de protección contra<br/>incendios forestales en el macizo montañoso Guamuhaya .....</b>  | <b>56</b> |

## **Medio ambiente, desarrollo sostenible y políticas energéticas, con una perspectiva socialista desde América Latina y el Caribe**

### **Environment, sustainable development and energy policies, from a socialist perspective within the Latinamerican and Caribbean región**

*Dr.C. José Alberto Jaula Botet\**

*\* Doctor en Ciencias y Profesor*

*Titular del Centro de Estudios*

*de Medio Ambiente y Recursos Naturales (CEMARNA),*

*Universidad de Pinar del Río, Cuba*

*e-mail: jaula@vrect.upr.edu.cu*

#### **Resumen**

El presente trabajo consiste en un estudio contentivo de una visión crítica de las actuales políticas energéticas, que propugnan la utilización de cultivos alimentarios para producir agro-combustibles, a partir de un basamento dotado de apariencia ambiental, con el objetivo de contrarrestar los efectos del vaticinado cambio climático, pero bajo una interpretación ajena a la ciencia ambiental y a favor de perpetuar el predominio del capital sobre los países del Sur; todo ello, frente a una alternativa para construir un nuevo paradigma y conocimiento ambientales, que tributen a políticas energéticas consecuentes con un pertinente y sensato desarrollo sostenible, en los ámbitos de la naturaleza, la sociedad y la economía, que inexorablemente debe converger con las legítimas aspiraciones de los pueblos de América Latina y el Caribe de construir el socialismo.

**Palabras clave:** Política energética, impacto ambiental, agrocombustibles, Revolución Energética en Cuba

#### **Abstract**

The present work entails a study containing a critical vision of current energy policies, which advocate the use of food crops to produce agro-fuels, from a basement endowed with an environmental appearance, aimed at counteracting the effects of climate change, but under an interpretation non-based on environmental science and favoring the continuation of the predominance of capital over the countries of the South; all this, versus an alternative to building a new paradigm and environmental knowledge, that contribute to energy policies consistent with a sustainable development, in the fields of nature, society and economy, which must inexorably converge

with the genuine aspirations of the peoples of Latin America and the Caribbean to build a socialist society.

**Keywords:** Energy policy, environmental impact, agrofuels, Energy Revolution in Cuba

## **Introducción**

El conflicto ancestral entre la sociedad y la naturaleza, a consecuencias de los incoherentes modelos de desarrollo civilizatorio impuestos por los seres humanos, ha derivado en una crisis ambiental planetaria, cuyo desenlace se desconoce, junto a la probabilidad de extinción de la especie humana.

En este artículo se evidencian los resultados de las políticas ambientales que desde una perspectiva exclusivamente económica, y en ocasiones social, con la lamentable exclusión de la naturaleza, en virtud de la prevalencia de un conocimiento matizado por la percepción humana y el afán de dominio sobre el medio natural, ha conducido a la degradación de los sistemas sustentadores de la vida en la Tierra.

Tanto ese paradigma ambiental, como la ciencia y la tecnología subordinadas, responden al saber cartesiano, melístico, disciplinar, antropocéntrico, asistémico, reduccionista, sincrónico, digitalizado, positivista, económicamente neoliberal y socialmente injusto, que, entre otras características, las clases dominantes han conseguido imponer desde sus posiciones de poder político, económico y cultural sobre los pueblos hasta el presente.

En el contexto de tanta ignorancia, así como ante la encrucijada suscitada por el desafío de garantizar el abastecimiento de combustibles, ante el dilema de evitar que el calentamiento global de la atmósfera conduzca a catalizar cambios en el clima, con pronósticos catastróficos a mediano y largo plazos para la propia especie humana, en el presente artículo se proponen medidas que, al menos, puedan paliar la «venganza» de la naturaleza sobre su ancestral «verdugo».

Por tal razón, la sociedad planetaria se afana en encontrar soluciones viables en materia energética, aptas para no comprometer el futuro cercano, por lo que en consecuencia se ha apelado a valorar y experimentar con diferentes fuentes alternativas de energía, con el objetivo, además, de sustituir los combustibles fósiles.

Es precisamente, bajo esta argumentación, que ha surgido el concepto de «agro-combustibles», a partir de la utilización de especies vegetales comúnmente cultivadas para la satisfacción de la alimentación humana, ya sea de forma directa o indirecta.

Esta diatriba que se encuentra en medio del debate universal actual, ha sido originada desde las entrañas del capital neoliberal que domina al planeta, y producto de su ignorancia ambiental y también con intención de falsear la verdad ambiental, que quizá haya permanecido oculta, en evitación de que su difusión e implementación conduzca por sus propios derroteros al alcance de una sociedad socialista.

### **El impacto ambiental de los agro-combustibles**

Las fuentes energéticas tradicionales, que a partir de la «Revolución Industrial» experimentaron un vertiginoso desarrollo, han consistido básicamente en los portadores fósiles de energía, especialmente en minerales, como el petróleo, sus gases acompañantes y la hulla, que dado su origen geológico se caracterizan por ser recursos renovables a muy largo plazo, respecto al tiempo histórico en el que se desarrolla el *Homo sapiens*.

La disyuntiva de la irrenovabilidad a corto o mediano plazos de las citadas fuentes, sumada a los efectos contaminantes que causan al medio ambiente, con el riesgo que presenta en la actualidad el efecto invernadero y el consecuente cambio climático, han acarreado un amplio debate en torno a la perdurabilidad de tales recursos como fuentes de producción de energía.

Como paliativo a este fenómeno y bajo el prisma del conocimiento ambiental reinante en el planeta, ha sido aceptada la apelación a nuevas fuentes energéticas alternativas, como reducción al excesivo uso de los portadores energéticos tradicionales, opciones estas que tienden a evitar el agotamiento de aquellas fuentes tradicionales y, además, a aminorar sus efectos contaminantes.

A su vez, dentro de las fuentes energéticas alternativas, de forma atinada se han considerado los bio-combustibles, fundamentalmente a partir del aprovechamiento económico de la biomasa vegetal, resultado de diferentes procesos de producción y servicios, en los cuales se generan, en calidad de residuos y desechos, como materias primas inadecuadamente dispuestas en el ambiente.

Tal concepción se inserta dentro de los tenores del nuevo conocimiento ambiental por el anhelado y quimérico desarrollo sostenible, por provocar en impactos ambientales relativamente reducidos, toda vez que sustituyen la utilización de recursos naturales de preciado valor para la humanidad, al igual que pueden representar una posibilidad para que no aumente la contaminación ambiental.

En efecto, los bio-combustibles contribuyen a la degradación ambiental, de acuerdo con Bronstein [2007], si bien el etanol produce menos emisiones de carbono, el proceso de su obtención contamina la superficie del suelo y el agua, por el aporte de nitratos, herbicidas, pesticidas y desechos, y el aire con aldehídos y alcoholes que son cancerígenos; todo ello, sin incluir el deterioro ambiental que en la naturaleza, la sociedad y la economía, inducen los cultivos agrícolas convencionales.

Los bio-combustibles con uso ambiental más profuso hasta el presente, han sido los residuos y desechos producidos por las actividades agrícolas, forestales, ganaderas, industriales, domésticas y otras, que lejos de favorecer una reducción sustantiva de la contaminación ambiental, al menos constituyen un atenuante a la escasez de los llamados «combustibles fósiles».

Un ejemplo de bio-combustible muy válido en términos ambientales es el biogás, por constituir un portador energético con escasos residuos y proveer una energía noble al medio ambiente, sin precisar de su combustión y emisión significativa de gases de efecto invernadero, como otras fuentes energéticas de corte semejante.

Pero sin lugar a duda, los portadores energéticos más inocuos al medio ambiente suelen ser aquellos capaces de producir energía «limpia» sin producir impactos negativos al ambiente, debido a lo cual hasta el presente se catalogan entre los más avanzados, aquellos derivados de fuentes energéticas, tales como la solar fotovoltaica, la eólica y la marítima.

En la búsqueda de los combustibles más indicados e para dirigir el desarrollo hacia el alcance de la sostenibilidad (incluidos en la categoría de bio-combustibles), han surgido los agro-combustibles, como otra fuente alternativa a los combustibles fósiles y de expedita obtención desde una perspectiva tecnológica, aunque en modo alguno se erige como solución definitiva a las limitaciones que presentan los combustibles tradicionales.

Tal concepción tiene su principio básico en la necesidad de obtener combustibles de origen vegetal, como el etanol, con el propósito de utilizarlo en el transporte automotor y, por consiguiente, reducir la creciente demanda de gasolina y de petróleo, para prolongar la vida útil de los yacimientos existentes, o por descubrir en el futuro, así como también, en cierta medida, por ser menos aportadores de gases de efecto invernadero y, consecuentemente, menos propensos a favorecer el cambio climático, que los combustibles fósiles.

Existen suficientes elementos para cuestionar la actual práctica que sobre los agro-combustibles se aboga, fundamentalmente, por parte de los países más industrializados, como paliativo a la reducción de los efectivos

disponibles y potenciales de hidrocarburos en el planeta, altamente demandados por las esferas que ostentan el poder económico y financiero del mundo.

Como resultado de las experiencias más generalizadas hasta el presente, en torno a los cultivos agrícolas destinados a la producción de agro-combustibles, se encuentran entre otros, la caña de azúcar y el maíz, como también el trigo, el girasol, la colza y la palma aceitera, que, por otra parte, son importantes fuentes de alimentos para seres humanos o animales de cría en diversas partes del mundo en desarrollo. Existen otros cultivos que representan menos aportes alimentarios para los humanos y la ganadería, entre los cuales se encuentran varias especies de oleaginosas, el árbol de *Jatropha curcas* y el pasto varilla, además de otras especies de gramíneas.

El autor estima que no son muy halagüeñas las expectativas que se cifran por la utilización de carburantes como el etanol y el bio-diésel, en comparación con los muy probables efectos ambientales negativos derivados de la reducción de la disponibilidad de suelos con aceptable capacidad agrológica, el descenso de las ya escasas reservas de agua apta para el riego agrícola, la disminución de los alimentos para los seres humanos y el incremento de los precios de tales productos, así como la amenaza a la biodiversidad agrícola en primer plano, y a la general en el sentido más amplio.

De acuerdo con la Organización de Naciones Unidas [2007], la producción de bio-combustibles a partir de plantas agrícolas, amenaza el derecho a la alimentación adecuada de 854 millones de personas en el mundo, que en la actualidad padecen de hambre, por lo cual, con el incremento de los precios de los alimentos, se podrían provocar nuevas conmociones sociales y políticas, fundamentalmente en las catorce naciones más pobres, donde 35% de la población permanece en tan precaria situación.

El propio informe abunda sobre algunos de los factores que por razón del uso de los agro-combustibles, amenazan a la seguridad alimentaria de la población mundial, según se conoce, como son la demanda de bio-combustibles en sentido general, el cambio climático, la baja productividad y la falta de acceso a los mercados [Organización..., 2007].

De otra parte, se expone por Mittal [2007] que el uso de cosechas para alimentar automóviles, en lugar de seres humanos, estimula la demanda y provoca aumentos de precios en toda la cadena productiva y a través de las fronteras, además del uso intensivo de valiosos recursos como la tierra y el agua, con el fin de alimentar las ganancias de las empresas y del estilo de vida estadounidense, y se extiende a otros millones de personas en todo el mundo.

Todo ello podría suscitar, además, una mayor expansión de la frontera agrícola, a expensas de sabanas y bosques naturales, con el consecuente impacto ecológico negativo, en virtud de su sustitución, por ser destinados a la producción de agro-combustibles.

Tomadas en consideración las estadísticas ofrecidas por el Consejo Mundial de Aguas [2007], se estima que para el 2015 el número de habitantes afectados por la severa escasez de agua, será de 3 500 millones en todo el mundo, a la vez que la demanda de tan vital recurso para ser utilizado en el riego de los agro-combustibles pudiera agravar esa dramática situación.

No menos importante será evaluar las consecuencias que para el incremento del efecto invernadero y del cambio climático, pueda acarrear la transportación a grandes distancias de enormes cantidades de agro-combustibles, tanto en el orden nacional, como transcontinental.

Este panorama es coherente con la política del capitalismo, en su fase de globalización neoliberal, destinada a mantener su dominio hegemónico sobre el resto del planeta, con el objetivo de utilizar sus recursos naturales, humanos, mercados y otras fuentes de influencia en su propio beneficio, sin menoscabo alguno de la pobreza, la ignorancia, la incultura, la injusticia social y la crisis ecológica.

Es obvio, por lo tanto, que las economías más avanzadas del planeta continúen expoliando al llamado Tercer Mundo, exacerbando las condiciones de inequidad e injusticia social, que matizan el sombrío panorama mundial contemporáneo, al proponer una nueva tecnología de opresión y sumisión, al servicio de los monopolios y de los mayores consumidores, que comúnmente no residen en los países del Sur de la Tierra.

### **El conocimiento ambiental y los agro-combustibles**

Como la mayoría de las políticas y acciones del capitalismo, la alternativa de los agro-combustibles a partir de cultivos alimenticios es otra fórmula manipulada por las esferas del poder político y económico, para construir un nuevo capítulo de diversionismo científico y tecnológico, a la vez que edulcora una alternativa que cautiva por sus aparentes buenas intenciones de favorecer a los más humildes y al medio ambiente en su conjunto.

Una vez más hace acto de presencia la manipulación de la ciencia y de la tecnología, nutrida de profesionales asalariados del propio capital, en función de falsear los fundamentos que sostienen la utilización de dichos agro-combustibles, así como de sus implicaciones reales para la población planetaria y el medio ambiente.

La teoría y la práctica que sostienen la propuesta de los agro-combustibles a partir de cultivos de alimentos para el ser humano y la ganadería, no han ofrecido otro resultado que aquel derivado de una interpretación sesgada ex profeso, del conocimiento ambiental pertinente a la sostenibilidad, a solicitud expresa del capital y como herramienta de poder y de dominio sobre los pueblos del mundo en desarrollo.

El discutido éxito que se le atribuye a los agro-combustibles, tampoco rebasa el umbral del conocimiento ambiental, y apenas alcanza la calificación de tecnología pseudo-ambiental, por excluir en su concepción y alcance los atributos que se interpretan científicamente para avalar un futuro desarrollo sostenible.

Bajo el prisma de un sensato juicio ambiental, no caben dudas de que el concepto actual que prevalece sobre los agro-combustibles y sus efectos, se aparta de los más elementales principios que prevalecen respecto a la actuación humana dentro del sistema ambiental.

Dados los citados antecedentes, el aporte de los agro-combustibles no evidencia una correspondencia con los referentes que deben caracterizar al nuevo saber ambiental [Jaula, 2002, 2004 y 2006], en tanto se estima como una solución muy parca a la problemática actual que enfrenta la humanidad, y que a continuación es objeto de un somero análisis.

Ante todo, se reconoce del carácter sistémico que caracteriza a los estudios sobre el medio ambiente; sin embargo, no se le ofrece semejante enfoque a los agro-combustibles (recurrentemente abordado de forma disciplinar) en su inexorable inserción en el sistema ambiental.

Lo anterior evidencia la necesidad de reconocer al sistema ambiental a escala general, conformado por la sinergia que se deriva de la interacción de los grandes sub-sistemas de la naturaleza, la sociedad y la economía, que a su vez se encuentran constituidos por innumerables sub-sistemas, sin que alguno de ellos funcione independiente de los demás que conforman el sistema ambiental.

El medio ambiente, como sistema, precisa abarcar la totalidad de los elementos y fenómenos que determinan toda la trama de la vida en el planeta, y para ello se debe estudiar en los múltiples sistemas a diferentes escalas y contextos, en los cuales se produce el perenne estado de equilibrio dinámico evolutivo, donde se realiza el recurrente intercambio de materia, energía e información, que sostiene el funcionamiento de los sistemas ambientales.

Por su basamento melístico, el concepto de agro-combustible se riñe con una solución ambiental eficaz a escala global, por cuanto con

independencia del alcance de ciertos logros locales, el conjunto de los mismos en el proceso de producción, de transporte, en el mercado y el consumo de tales portadores energéticos, debe continuar aportando gases de efecto invernadero a la atmósfera planetaria y, por lo tanto, no contribuye significativamente a una reversión efectiva del cambio climático a escala global.

Todo ello tampoco contribuye a la disminución de los impactos ambientales negativos que se producen en los suelos, las aguas, el aire atmosférico, el paisaje, la sociedad y la economía local, además del ambientalmente nefasto monocultivo.

La visión disciplinar que pretende soportar la propuesta de los agro-combustibles, carece de la necesaria transdisciplinariedad que debe identificar al saber ambiental, con la inexorable concurrencia de áreas cognitivas, como aquellas referidas al respeto de la capacidad de sostenibilidad de cada tipología de agro-sistema, a la diversidad de cultivos, a la variedad de los paisajes, a la conservación de la biodiversidad agrícola, al control biológico, a la diversidad de alimentación y de satisfacción de otras necesidades por la población rural local, además del mantenimiento incólume del sistema económico predominante con la gran externalización de lo ambiental. Muy distante del saber ambiental que se precisa para adecuar de forma pertinente la adopción de los agro-combustibles eficientemente dentro de los referentes hacia la sostenibilidad, se reconoce por este autor la insuficiente existencia de la formación ambiental universitaria correspondiente, dada la prevalencia de muchas carreras universitarias con denominaciones ambientales y con apariencia de estudios trans-disciplinarios, que en la mayoría de los casos apenas rebasan a duras penas el umbral de las ciencias disciplinares que les han dado origen.

Hoy existen diversas carreras universitarias con la denominación de «ciencias ambientales», que en todo caso solamente consisten en estudios inter-disciplinarios, como pueden ser la biología ambiental, la economía ambiental o la sociología ambiental, entre otras, que no cubren el espectro del conocimiento ambiental, que insoslayablemente debe ser trans-disciplinar.

Tampoco abundan los estudios sobre energética ambiental, que resulten pertinentes con el conocimiento de los sistemas ambientales, lo cual es una evidente carencia al considerar a los agro-combustibles con enfoque de sostenibilidad.

De otra parte, el enfoque antropocéntrico de los agro-combustibles es contradictorio con respecto al conocimiento ambiental que hoy reclama el

planeta, en virtud de que se basa en una posición netamente humana, como si el resto del ambiente estuviese sumido única y exclusivamente al pensamiento y a la actuación de una sola especie. Hasta el presente, el conocimiento tradicional ha contribuido más que a favorecer el ambiente, a degradarlo, al extremo de poner en peligro su propia supervivencia como especie.

En oposición al enfoque que sostiene la alternativa de los agro-combustibles, se precisa de una posición más ambiocéntrica, que coloque al ser humano insertado en el ambiente al cual pertenece y que propenda con sus acciones de desarrollo, a contribuir al beneficio de todo el ambiente y no solamente a una especie dentro de lo infinito, de lo biótico y abiótico presente en el sistema ambiental planetario, que reclama por una urgente atención.

Por otra parte, la imposición de las especies vegetales para agro-combustibles sobre suelos por la simple marginalidad o desocupación de los mismos, hasta incluso por el análisis de su capacidad agrológica, se contrapone a un saber ambiental pertinente, que precisa de la evaluación de la capacidad de respuesta del suelo a dichos cultivos, o lo que es lo mismo, identificar el grado de aceptación de esas y no de otras especies a dichas nuevas condiciones.

La visión al corto plazo implícita en la utilización masiva de los agro-combustibles, también se aparta del enfoque ambiental del desarrollo sostenible, por cuanto consiste en una solución paliativa y circunstancial, sin perspectivas de que pueda ser sostenida en el tiempo, debido a que, por ejemplo, las nuevas tecnologías que puedan ser capaces de producir energías «limpias», se podrán satisfacer el vacío científico y tecnológico en esta esfera.

En el sub-sistema económico del ambiente, los agro-combustibles se insertan como un resultado más de la economía excluyente de lo ambiental, en la cual la naturaleza y sus recursos se encuentran subordinados a los mecanismos del mercado. Un nuevo conocimiento ambiental no debe desconocer que, en todo caso, debe ser la naturaleza y sus recursos los regentes del mercado, y no a la inversa.

Tampoco el sub-sistema económico imperante, con la masificación de la producción de agro-combustibles, persigue el objetivo de desterrar la pobreza que afecta el paisaje mundial, sino por el contrario, los mayores dividendos económicos engrosarán las arcas de los centros de poder, en lugar de redistribuir la riqueza planetaria a toda la población.

Por otra parte, el sub-sistema social del ambiente, acoge a los agro-combustibles a manera de una continuación de la inequidad e injusticia que

prevalece en la mayoría de la población del planeta, sencillamente por no incluir el acceso pleno de la población del orbe a disfrutar de los plenos derechos básicos para subsistir en condiciones dignas y jurídicamente plenas.

Otra arista de la problemática inherente a la expansión de los agro-combustibles, se refiere a la satisfacción del «consumismo» por parte de la población rica del planeta, en contraposición con un enfoque equilibrado y justo del consumo mundial.

De igual forma, la aspiración del mundo industrializado de satisfacer sus demandas de combustible para los automóviles, que constituyen una de las mayores fuentes de consumo de combustibles fósiles y de contaminación de la atmósfera, no puede generalizarse a la totalidad de la población mundial. En cambio, la civilización contemporánea debe cifrar sus expectativas hacia la reducción de la cantidad de automóviles por persona en el Primer Mundo, así como al incremento de los medios alternativos y colectivos de transportación, que generen menor impacto negativo al medio ambiente.

Si en la actualidad el conocimiento pseudo-ambiental que pretende fundamentar el uso de los bio-combustibles, como una medida curativa ante la severa crisis ambiental prevaleciente; de otra parte, un sensato saber ambiental enfocado hacia la sostenibilidad, por el contrario, debe abogar por acciones también preventivas, en evitación de la aparición de nuevos impactos ambientales.

En otro orden, colocar las actuales tecnologías pseudo-ambientales como argumentación para incrementar los agro-combustibles, deplora la aspiración de un nuevo conocimiento ambiental, por la investigación científica y la innovación tecnológica, a favor de acceder a pertinentes tecnologías que no produzcan impactos nefastos al medio ambiente.

En el contexto de la cultura ambiental, la aparición de los agro-combustibles también puede implicar el riesgo de imponer sus modelos de producción y de subsistencia, en detrimento de la cultura agropecuaria tradicional, correspondiente al patrimonio ancestral de pueblos y comunidades campesinas e indígenas en todo el orbe.

No se deben descartar los beneficios económicos que a corto plazo representan estos portadores energéticos para cifras elevadas de agricultores, cuyas ganancias se destinan mayormente a los propietarios de grandes extensiones de suelos, y de las empresas dedicadas a la comercialización y venta de los combustibles, sin que semejante tributo llegue a la mayoría de los obreros agrícolas y a los pequeños agricultores que se sumen al cultivo de dichas plantas.

La adopción de una estrategia para producir agro-combustibles, que resulte compatible con un conocimiento ambiental en la búsqueda de un futuro desarrollo sostenible, obliga a excluir a los cultivos para la alimentación humana, mientras que impere el hambre y la pobreza en el planeta.

Por cuestión de ética elemental con la propia especie humana, en coincidencia con Castro [2007], no se debe permitir que los alimentos sean convertidos en energéticos para viabilizar la irracionalidad de una civilización que, para sostener la riqueza y los privilegios de unos pocos, incurre en un brutal ataque al medio ambiente y a las condiciones ecológicas que posibilitaron la aparición de la vida en la Tierra, amén de la condena a muerte prematura por hambre y sed a más de 3 000 millones de personas en el mundo.

### **El modesto ejemplo cubano**

La República de Cuba, país en vías de desarrollo con 11,5 millones de habitantes y una superficie algo superior a los 114 mil kilómetros cuadrados, inmerso en una difícil situación económica y financiera, así como carente de recursos energéticos, ha encarado el desafío de una «Revolución Energética» sin paralelo en el mundo contemporáneo, implementada para poder enfrentar el continuado ascenso de los precios de los hidrocarburos en los últimos años.

Obviando por principios la exclusión de los agro-combustibles dentro de la proyección estratégica del país para sortear los obstáculos de la severa limitación energética, Cuba ha apelado a un programa de incremento sustantivo del ahorro de energía, que compulse la reducción de importaciones de combustibles y carburantes, que se inició en el 2005, y aún continúa en desarrollo.

En el marco de las acciones ejecutadas hasta el presente dentro de la Revolución Energética, se realizó la total sustitución de las luminarias incandescentes por fluorescentes, así como el reciclaje masivo de todos los equipos eléctricos, ya sean domésticos, comerciales, industriales, de transporte y de uso social, por otros análogos de menor insumo y mayor eficiencia energética.

Se han distribuido a la población más de 22,5 millones de equipos electrodomésticos, con lo cual, además, se logró beneficiar a 75% de los núcleos familiares que solamente disponían de equipos de kerosén para la cocción de sus alimentos.

Se han instalado casi cinco mil grupos electrógenos de emergencia para evitar los «apagones», ofrecer vitalidad a instalaciones clave de orden

social y económico, y asegurar el servicio eléctrico en situaciones extremas, provocadas por huracanes y otros fenómenos o catástrofes naturales.

En la eliminación del déficit de generación eléctrica y la creación de nuevas capacidades, un elemento fundamental ha sido la instalación de motores diésel y de fuel oil; es decir, la llamada generación distribuida por territorios y el logro de su independencia del Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

De otra parte, se realizan importantes inversiones para incrementar el empleo del gas acompañante del petróleo, de los recursos hidroenergéticos y de la energía eólica en la generación de electricidad.

También ha sido posible reducir las pérdidas en la transmisión de electricidad, incrementar la producción de cables y de transformadores eléctricos, y se están mejorando las redes de distribución de esa energía, así como eliminar las zonas de bajo voltaje.

Con estas acciones, la Revolución Energética emprendida en Cuba ha logrado la total eliminación de los «apagones» por déficit de generación eléctrica, y su resultado integral general ha influido positivamente en la calidad de vida de la población; en la disminución de la contaminación ambiental; también, ha significado una modesta contribución al enfrentamiento a los graves problemas asociados al cambio climático; un giro radical en los conceptos de generación y uso de la energía, el ahorro sustantivo de combustible y la disminución de las importaciones de combustibles para generar energía eléctrica.

## **Conclusiones**

La puesta en práctica de forma masiva y ambientalmente incongruente del cultivo de los agro-combustibles, no constituye una práctica consecuente con el conocimiento ambiental enfocado hacia el desarrollo sostenible, sino por el contrario, por las implicaciones negativas que supone para el sistema ambiental, abordado en sus mayores sub-sistemas de la naturaleza, la sociedad y la economía, debe acelerar significativamente el deterioro ambiental que experimenta el planeta.

Una alternativa plausible para acceder a la utilización de los agro-combustibles, puede consistir, según el autor, en la utilización de desechos agrícolas, de residuos de cosechas, de cultivos agrícolas, de aserrín y otros residuos de aserraderos de maderas, de residuales orgánicos diversos y de plantaciones de especies vegetales no comprometidas con la alimentación humana, todos con aceptable potencialidad para la producción de biomasa.

Por supuesto, para el fomento de tales especies destinadas a la producción de agro-combustibles, además deben ser seleccionados suelos con reducidas demandas hídricas y baja fertilidad, de manera que se encuentren descartados de la producción agrícola de alimentos con destino humano.

Una solución sensata desde la perspectiva medioambiental para encarar exitosamente el desafío energético, consiste en realizar acciones que consideren los aspectos de la naturaleza, la sociedad y la economía.

Sin ánimo de ponderar el aporte cubano frente al debate que impone el desafío planetario de contribuir a aplacar los efectos del cambio climático, se logra constatar la marcada diferencia entre los basamentos ambientales de los programas derivados de los diferentes sistemas socioeconómicos conocidos hasta el presente, donde el capitalismo intenta imponer al mundo una visión distorsionada e incongruente del saber ambiental, con el pretexto de propender a las aspiraciones de la humanidad al desarrollo sostenible, signado por un enfoque embustero para continuar dominando al mundo, mientras que en el socialismo se aboga por una interpretación científica pertinente del conocimiento ambiental, con un tributo objetivo a la anhelada sostenibilidad, que incluye en su conjunto a la naturaleza, la sociedad y la economía.

## **Bibliografía**

- BRONSTEIN, V. (2007). *La supuesta benignidad de los biocombustibles*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2007. 32 pp.
- CASTRO, FIDEL (2007). *Reflexiones de Fidel*, Tabloide Especial del diario *Granma*, no. 5, 2007. 16 pp.
- Consejo Mundial de Aguas (2007). *Estado del agua para el 2015*. Nueva York, 2007. 18 pp.
- JAULA, J. A. (2002). *Sobre el reto de la Universidad frente a la protección del medio ambiente y el desarrollo sustentable*. Ciudad Guayana: Universidad Católica Andrés Bello, 2002. 22 pp.
- JAULA, J. A. (2004). «Medio ambiente y desarrollo sostenible en la nueva Universidad», en Memorias del 5to. Congreso Internacional de Educación Superior, UNIVERSIDAD 2006, La Habana, 2004. 36 pp.
- JAULA, J. A. (2006). «Medio ambiente, ideología y desarrollo sostenible», en *Proteo*, Universidad La Sapienza, Roma, 2006. 30 pp.
- MITTAL, A. (2007). *Los agrocombustibles y los movimientos sociales*. San Francisco: Instituto Oakland, 2007. 42 pp.
- Organización de las Naciones Unidas (2007). *Informe a la Asamblea General sobre Derecho a la Alimentación*. Nueva York: ONU, 2007. 23 pp.

## **Elaboración de mapas de distribución de la energía de las olas, y su aprovechamiento como fuente renovable**

### **Preparation of maps of wave energy distribution, and its use as a renewable source**

*Por Mylene Jaen Cabrera\*,  
Adrián Luis Ferrer Hernández\*  
y Amílcar E. Calzada Estrada\*\**

*\* InSTEC, Cuba. \*\* Instituto  
de Meteorología (INSMET), Cuba.  
e-mail: myleni@instec.cu, aluis@instec.cu,  
amilcar.calzada@insmet.cu*

### **Resumen**

El presente artículo está encaminado a proponer una vía alternativa para la producción de electricidad a partir de la utilización de la energía producida por las olas. El desarrollo del trabajo se basa fundamentalmente en la utilización de las variables meteorológicas: altura significativa de la ola, dirección de la misma y período de la ola, que abarca un intervalo de siete años, desde el 2000 hasta el 2006. El área geográfica utilizada es el archipiélago cubano y sus mares adyacentes. El análisis de determinación de la ubicación de puntos de alto nivel energético fue basado en el uso de ficheros binarios (.grb), para el software de código abierto GrADS. La utilización práctica de este estudio conllevará a que el país tenga a su disposición una alternativa para la obtención de energía eléctrica independientemente del inestable precio del petróleo y, a su vez, contribuirá a la disminución de gases de efecto invernadero que intensifican el cambio climático.

**Palabras clave:** Energía de las olas, software GrADS, energía del mar

### **Abstract**

The present article is aimed at proposing an alternative way for the production of electricity from the use of wave energy. The development of the work is based fundamentally on the use of meteorological variables: significant height of the wave, direction of the wave and period of the wave, covering an interval of seven years, from 2000 to 2006. The geographical area used is the Cuban archipelago and its adjacent seas. The determination analysis of the location of points of high wave energy potential was based on the use of binary files (.grb), for the open source software GrADS. The practical use of this study will lead to the country having at its disposal an alternative for obtaining electric power regardless of the

unstable price of oil and, in turn, will contribute to the reduction of greenhouse gases that intensify climate change.

**Keywords:** Wave energy, GrADS software, ocean energy

Introducción  
En los últimos años se ha acrecentado el interés por el desarrollo de fuentes alternativas de energía. El progresivo aumento de la población mundial, el constante incremento del precio del petróleo y la contaminación atmosférica, son algunos de los factores que favorecen el desarrollo de las fuentes renovables de energía. Algunas de ellas, como la energía eólica, han tenido una evolución espectacular. Otras, sin embargo, continúan aún sin haber explorado todo su potencial. Este es el caso de las energías marinas.

Una característica de las energías marinas es su densidad, la cual es muy superior a la de otras fuentes renovables existentes; sin embargo, cabe destacar las grandes dificultades que existen para extraer dicha energía, ya que el mar es un medio adverso de por sí.

En la actualidad, el aprovechamiento de las energías marinas es mínimo, con una potencia instalada reducida a varias plantas pilotos situadas en unos pocos países. No obstante, los primeros intentos de su aprovechamiento se remontan a fechas similares con otras fuentes renovables. Se puede decir que las energías marinas se encuentran en un momento divergente tecnológicamente en el que existen muchas ideas, pero ninguna ha demostrado su liderazgo tecnológico.

Del mar se puede obtener energía aprovechando fundamentalmente cinco fenómenos (Fig. 1):

1. Mareas: El ascenso y descenso del nivel del agua del mar producido por las influencias gravitatorias del Sol y la Luna.
2. Oleaje: Las olas son producidas por la acción del viento sobre la superficie del mar. Posteriormente estas se trasladan recorriendo centenares de kilómetros.
3. Corrientes marinas: Se originan por la diferencia de densidad y contenido de sal del agua, así como por la temperatura, la evaporación y la rotación de la tierra.
4. Gradiente térmico: El calor solar sobre el agua de mar provoca una diferencia de temperatura entre las aguas superficiales y las del fondo, que puede alcanzar 20 °C.
5. Gradiente salino: Consiste en aprovechar la diferencia de salinidad entre el agua de los océanos y el agua de los ríos.

Aunque todas las formas de extraer energía del mar están en pleno desarrollo, cabe destacar que la tecnología referida al oleaje reporta un mayor número de proyectos de investigación.



Fig. 1. Esquema del potencial de energías renovables en el mar.

### Antecedentes históricos

La idea de aprovechar la energía del oleaje no es un concepto reciente. En 1979 fue registrada en París la primera patente que consistía en aprovechar el movimiento oscilatorio provocado por una palanca gigante acoplada a un arco, para accionar diferentes dispositivos mecánicos, tales como cierras y bombas.

A lo largo del siglo XIX el interés por la energía del oleaje se incrementa. Un estudio realizado por el National Engineering Laboratory, del Reino Unido, indica que entre 1860 y 1890 el ritmo de presentación de patentes es aproximadamente de tres por año, alcanzando, a principios del siglo XX, las seis por año. En general, se trataba de patentes de dispositivos que proponían aprovechar el movimiento oscilatorio de las olas por medio de bombas y otros medios mecánicos (engranajes, cremalleras, trinquetes, cables o palancas).

Una de las primeras aplicaciones prácticas de la energía del oleaje fue el dispositivo creado por Boucheaux-Praceique en Royan, cerca de Burdeos, alrededor de 1910.

La Segunda Guerra Mundial obliga a dar un salto en el conocimiento de la dinámica del oleaje. En esa época comienzan los trabajos de Yoshio Masuda, del Japan Marine Science and Technology Center (JAMSTEC), que materializa, en 1965, la primera aplicación comercial.

La ciencia e ingeniería del aprovechamiento de la energía del oleaje, basada en teorías y métodos apropiados de investigación, comenzó realmente después de 1973, a consecuencia de la crisis del petróleo, que obligó a explotar todas las posibles fuentes alternativas de energía.

## **Problemática y objetivos**

Debido al elevado precio actual del petróleo y a la crisis económica que enfrenta Cuba, se presenta la necesidad de encontrar nuevas vías para la obtención de energía eléctrica. En tal sentido se formula el problema científico siguiente: ¿Cómo contribuir a la economía del país con una nueva forma de producción de energía eléctrica?

Los objetivos del proyecto de investigación, fueron:

- Realizar un procesamiento propio por medio de la herramienta GrADS para la obtención de valores estadísticos sobre los niveles energéticos de las olas en el área del archipiélago cubano y sus mares aledaños.
- Obtener mapas promedios anuales de los contenidos energéticos en el área de estudio.
- Proponer, mediante su ubicación geográfica, los lugares que presenten un alto potencial energético de las olas para producir energía eléctrica.

Los métodos empleados fueron:

- Métodos teóricos: El histórico-lógico, mediante la consulta en el INSMET, de todo el material bibliográfico que sirviera como antecedente del trabajo y punto de partida de los objetivos propuestos.
- Métodos matemáticos-estadísticos: Por mediación del software libre GrADS se obtuvieron los valores necesarios para la descripción tanto cualitativa como cuantitativa de la magnitud energética que poseen las olas.
- Método comparativo: Se aplicó mediante el análisis entre los mapas promedios anuales generales y los mapas promedios mensuales, en busca de interpretaciones significativas que permitieran arribar a conclusiones.

## **Desarrollo**

El mar abarca 360 millones de kilómetros cuadrados, más de 70% de la superficie del planeta. El hombre ha extraído del océano cuantos recursos le ha permitido su ingenio: alimentos, tesoros, sal, medicamentos... A lo largo de las últimas décadas, además, los ojos del ser humano han empezado a mirar el mar como yacimiento energético. Porque, como señala el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, el océano es el mayor colector solar del mundo. En otras palabras, el mayor almacén de energía. Esa energía está encerrada en las corrientes de agua, en la

biomasa marina (ya es posible obtener gases combustibles de ciertas algas marinas), en las mareas (cuatro cada día) o en las olas que levanta el viento. De todos esos fenómenos, y de algunos otros, también es posible obtener energía. En estos momentos, las posibilidades de aprovechamiento se centran, sobre todo, en la energía de las olas, la de las mareas (mareomotriz), la de las corrientes y la energía mareotérmica, que aprovecha la diferencia entre la temperatura del agua de la superficie (la que recibe el calor del Sol) y la temperatura de las aguas más profundas.

Debido al desarrollo tecnológico existente en el mundo en cuanto a la generación de electricidad a partir del oleaje y a las potencialidades que esta brinda, la presente investigación estará encaminada a desarrollar un método de identificación de puntos estratégicos para la instalación de dispositivos generadores de electricidad, encaminados al aprovechamiento de la energía generada por las olas (Tabla 1).

*Tabla 1. Ventajas y desventajas de la utilización de la energía producida por las olas*

| <b>Ventajas</b>                                    | <b>Desventajas</b>                             |
|--|--|
| Autorrenovables                                    | Ligero impacto visual sobre el paisaje costero |
| No contaminante                                    | Localización puntual                           |
| Forma arrecifes coralinos mejorando fauna y flora  | Dependiente de la amplitud de las olas         |
| Sin costo de materia prima, almacenable y versátil | Posible ruido, que puede minimizarse           |
| No desplaza población                              |  |
| Disponible en cualquier clima y época del año      |  |
| No produce gases de efecto invernadero             |  |

La energía de una ola depende de diversos factores. Simplificando, la potencia entregada por una ola se puede estimar como proporcional a su amplitud al cuadrado y al período. La unidad típica de medición es el kilowatt por metro de longitud de cresta (kW/m).

Superponiendo los diferentes tipos de olas en un cierto tiempo de un lugar dado, se puede lograr un espectro de olas, donde se obtiene una cierta amplitud y períodos característicos de cada lugar. Luego, bastaría con identificar los lugares con mayor y mejor energía (más constante) para la instalación de este tipo de generadores.

Actualmente, investigadores y especialistas de todo el mundo se dedican intensamente a buscar formas de generación de energía sin producir gases con efecto invernadero.

En el presente trabajo se identifican los lugares de mayor aporte energético, a partir de un extenso trabajo estadístico, mediante el empleo de la utilidad GrADS (desarrollada para Linux). El análisis tuvo en cuenta variables hidrometeorológicas, como la altura significativa y el período de la ola. A continuación se explica el procedimiento empleado:

- Obtención de los ficheros binarios (con extensión «.grb»), que constituyen las salidas trihorarias de los mapas de las variables antes mencionadas, creados a partir del Modelo Meteorológico (Wave Watch III, WW3, para Western North Atlantic).
- Elaboración de los archivos descriptores «.ctl», o intérpretes de los valores de las matrices que conforman a los ficheros binarios.
- Evaluación de los valores de los archivos para comprobar el grado de confianza obtenido en la investigación.
- Selección de la sección de los mapas de interés, para la creación de nuevos ficheros con la información a emplear.
- Obtención de los ficheros mensuales, mediante scripts desarrollados para la plataforma Linux Ubuntu 10,10 x86 (versión Desktop a 32 bits).
- Elaboración de los mapas promedios de las variables incluidas en la ecuación de la energía producida por una ola.

Para ello usamos la ecuación siguiente, obtenida de antemano:

$$E = (1,56 \rho g H^2 T) / 8$$

Donde:

$E$ : Energía mecánica de la ola ( $E = E_k + E_p$ ).

$\rho$ : Densidad superficial del mar,  $\rho = 1,025 \text{ kg/m}^3$ .

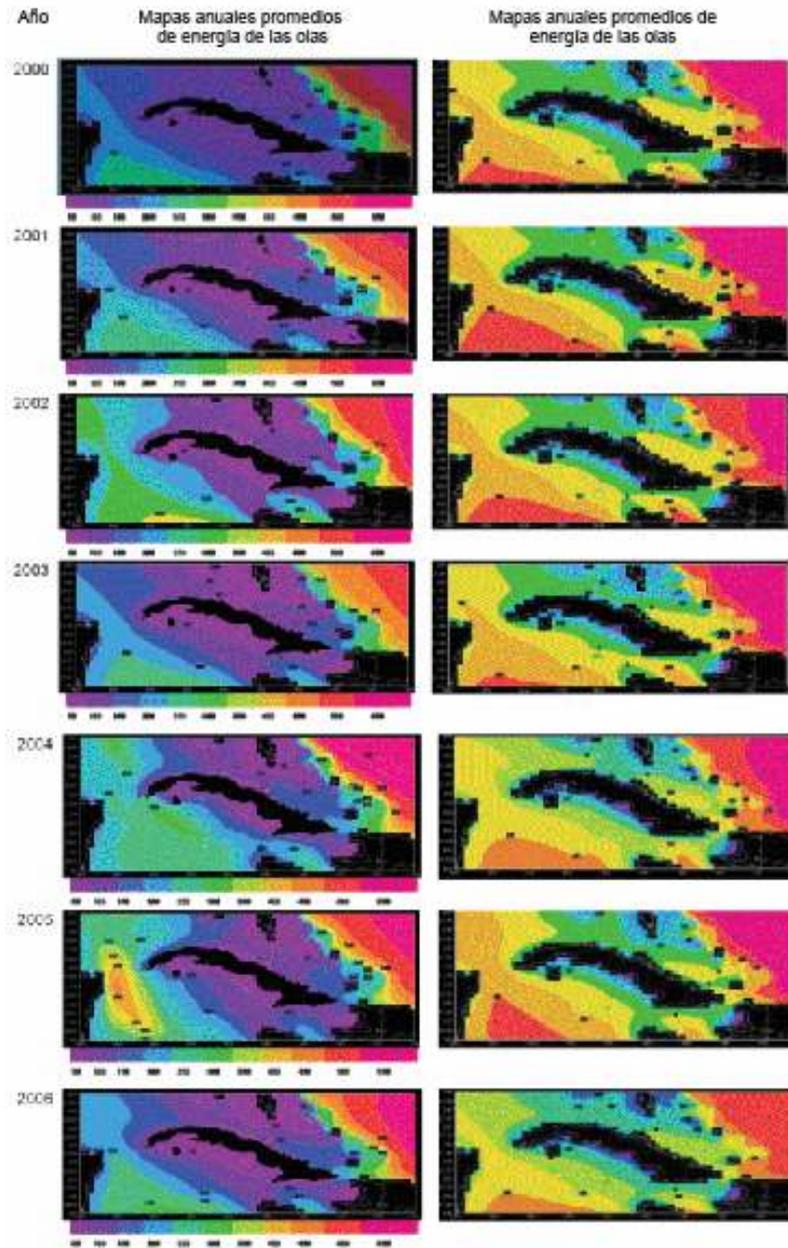
$g$ : Constante gravitacional en la superficie de la Tierra,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

$H$ : Altura significativa de la ola.

$T$ : Período de la ola.

## Resultados obtenidos

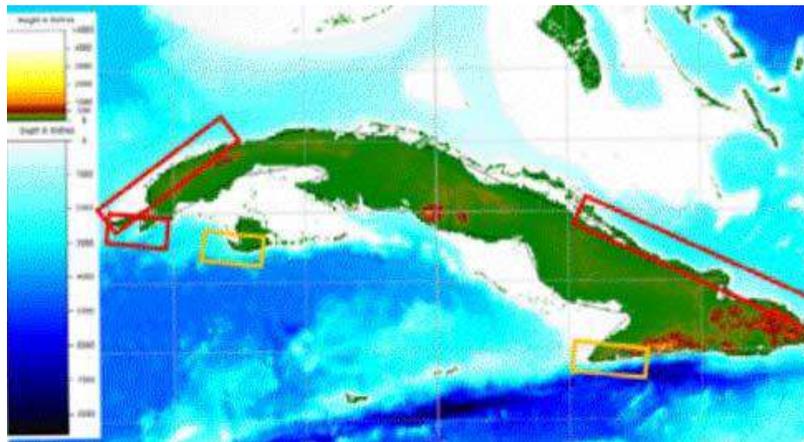
En la tabla 2 se pueden apreciar los resultados obtenidos de los promedios anuales de la energía de las olas y de sus alturas significativas. Dicho procedimiento se llevo a cabo mediante el comando «ave», realizando el cálculo de los mapas de energía, correspondientes al período entre el 2000 y el 2006.



*Tabla 2. Mapas anuales promedios de la energía de las olas y de la altura significativa de las olas*

Después de haber obtenido los mapas de la energía producida por el oleaje se determinó que los puntos más estratégicos para la posible ubicación de dispositivos generadores de electricidad a partir de esta fuente, son (Fig. 2):

- Porción Noroeste de Pinar del Río.
- Porción Sur del Cabo de San Antonio en Pinar del Río.
- Sur de la Isla de la Juventud.
- Sur de Granma.
- Sección de la costa norte que abarca desde Guantánamo hasta Camagüey.



*Fig. 2. Puntos más estratégicos para la posible ubicación de dispositivos generadores de electricidad a partir de las olas.*

Por otro lado, existen varias tecnologías para la obtención de energía eléctrica a partir de la generada por las olas (Fig. 3):

- Mediante un atenuador: Estructura flotante alineada en paralelo con la dirección de la ola, en la cual la estructura monta la ola. Los movimientos en su longitud pueden ser utilizados para producir energía. Uno de los modelos representativos de esta categoría es el Pelamis.
- Mediante un colector: Estructura flotante que captura las olas para concentrar la energía en un punto, donde se produce la conversión de la energía.
- Mediante rebalse: Estructura que utiliza una pared, la cual es sobrepasada por las olas, entrando a un depósito de agua. El depósito acumula energía potencial, descargando el agua a través de turbinas hidráulicas. Uno de los modelos representativos es el Wave Dragon, que posee un colector de olas (brazos del dispositivo) y en el centro, las turbinas.

- Columna de agua oscilatoria: Estanque abierto en la parte inferior, parcialmente sumergido en el agua superficial, de manera que el movimiento vertical de las olas produzca una diferencia de presión dentro del estanque, la cual es canalizada a turbinas para aire (comúnmente bidireccionales). Uno de los modelos representativos es el Wavegen.
- Conversores de atenuadores de ola: Dispositivo que captura el movimiento horizontal de las olas mediante una paleta pivoteada en la parte superior. La paleta oscila como un péndulo, permitiendo la conversión de la energía.
- Absorvedores de punto: Estructura flotante que absorbe energía en cualquier dirección dado por su movimiento cercano o en la superficie del agua. El absorbedor puede ser diseñado para que quede en resonancia a fin de maximizar la potencia. El dispositivo para transformar la energía cinética de la estructura puede tomar diversas formas, siendo el más común el uso de generadores lineales. Uno de los modelos representativos es el Aqua Buoy.
- Diferencial de presión sumergido: Estructura sumergida en el fondo marino cercano a la costa, que utiliza los avances y retrocesos de las olas en la costa, aumentando y disminuyendo el volumen de agua sobre él, y por ende la presión. Uno de los modelos representativos es el Ceto.
- Otros: Consisten en configuraciones especiales, de las cuales no se encuentra suficiente información disponible.



*Fig. 3. Instrumentos utilizados en la generación de energía eléctrica a partir de las diferentes fuentes energéticas existentes en el mar.*

## Conclusiones

- La utilización de GrADS permitió demostrar una gran eficiencia y una amplia gama de utilidades que brinda para el trabajo con este tipo de ficheros binarios, o sea, corrida de modelos o algún tipo de archivo de alguna variable específica. Su campo se extiende a todas las esferas de la meteorología, permitiendo un detallado análisis de los mapas de variables meteorológicas.
- En la presente investigación se desarrolló con gran eficiencia la determinación de puntos estratégicos en el mar, que permitirán la producción eficiente y estable de energía eléctrica durante todos los días del año; energía limpia que contribuye económicamente al país, además de aportar a la disminución de emisiones de gases contaminantes derivados de los combustibles fósiles.

## Recomendaciones

- Profundizar en las herramientas que brinda GrADS para el trabajo con datos binarios, y en el análisis de los mapas de variables en las corridas de modelos meteorológicos.
- Investigar, desde el punto de vista ingenieril, los resultados obtenidos y las tecnologías actuales existentes en el mundo para la instalación de dispositivos adecuados a las condiciones físicas-geográficas del lugar propuesto, y otras series de factores económicos que determinarán dónde será más eficiente y óptima la aplicación de esta tecnología en Cuba.

## Bibliografía

- CASALS TAYLOR, REINALDO. Tesis de Maestría. «Energía de las corrientes marinas», en <http://libros.redsauce.net> *Energías renovables*, Editorial Iberdrola.  
<http://web.ing.puc.cl/%7Epower/alumno07/generacion%20mareomotriz/home.html><http://www.apie.com.ar/Boletines/newsletter-05.html>  
<http://www.iges.org/GrADS>  
[http://www.ina.gov.ar/Seminario%2020-8\\_archivos](http://www.ina.gov.ar/Seminario%2020-8_archivos)  
<http://www.induambiente.com>  
<http://www.nimbar.net/index.htm>  
RODRÍGUEZ SOSA, MARIO. *Energía producida por las olas del mar*. Universidad Técnica Latinoamericana.  
RUIZ MÍGUELA, PABLO. «Energía del oleaje: Estado actual y perspectivas futuras», DYNA: abril, 2008.

## **Anexo**

Lo cierto es que quienes investigan estas tecnologías se muestran especialmente creativos. Sólo en el terreno de la energía de las olas (denominada undimotriz) hay al menos cincuenta prototipos diferentes en el mundo, aunque lo más posible es que sólo lleguen a la fase comercial unos pocos de ellos. Uno de los sistemas más avanzados es el Pelamis, popularmente conocido como serpientes marinas, desarrollado por la firma escocesa Ocean Power Energy (OPD), que se está probando en Portugal y el Reino Unido. Pero Pelamis tiene serios competidores. Por ejemplo, Wave Dragon, desarrollado por un equipo danés. Mientras tanto, Portugal se prepara para albergar máquinas Aqua Buoy, con una potencia total de 2 MW, fabricadas por Finavera, firma que tiene en funcionamiento desde el 2000 un prototipo más pequeño, de 500 kW, denominado Limpet, en las costas escocesas. Enersis, promotora de las fuentes renovables de energía en Portugal, ha anunciado su intención de tener instalados 5 000 MW en centrales de oleaje para el 2020.

**Resultados preliminares del estudio del viento con fines energéticos, a partir de la información proveniente de la red de torres meteorológicas de referencia para el programa eólico**

**Preliminary results of the study of harnessing the wind for energy purposes, based on information from the network of meteorological reference towers for the wind program**

*Por Alfredo Roque Rodríguez,  
Rolando Soltura Morales, Reinaldo Báez Altamirano,  
Alain Calzadilla, Karelia Fernández, Vladimir de la Hoz Matveeva,  
Isrel Serrat, Pablo Reyes, Pablo Varona, Orlando Osa, Mayra Santana  
\* \* Instituto de Meteorología (INSMET), La Habana, Cuba.  
Fax: (537) 8668010.  
e-mail: alfredo.roque@insmet.cu*

**Resumen**

La Red de Torres Meteorológicas de Referencia, creada como parte de las acciones emprendidas por el Grupo Eólico Nacional (GEN), ha logrado recopilar, en sus primeros dos años de medición, la información necesaria que permite caracterizar preliminarmente el viento en la capa superficial en diferentes condiciones físico-geográficas. Entre los principales parámetros caracterizados se encuentran la longitud de rugosidad o parámetro de aspereza  $Z_0$ , la velocidad de fricción  $u^*$  y el exponente alfa de variación del perfil vertical del viento. También fueron caracterizadas otras variables de interés para las aplicaciones eólicas, como la densidad del aire y la densidad de potencia del viento. Por último, fueron simuladas un grupo de máquinas con potencias entre 900-2 000 kW, con el objetivo de caracterizar el factor de capacidad (FC). Los resultados aportan una información general sobre el aprovechamiento del viento para producir electricidad en Cuba, atendiendo a diferentes condiciones físico-geográficas.

**Palabras clave:** Energía eólica, torres meteorológicas, medición del viento, factor de capacidad

**Abstract**

The Network of Meteorological Reference Towers, created as part of the actions undertaken by the National Wind Power Group (GEN), has managed to gather, in its first two years of operation, the necessary information that allows preliminary characterization of the wind in the surface layer in different physical-geographical conditions. Among the main parameters characterized are the roughness length or roughness parameter  $Z_0$ , the friction speed  $u^*$  and the alpha exponent of vertical wind profile

variation. Other variables of interest for wind applications were also characterized, such as air density and wind power density. Finally, several turbines with power installed capacities between 900-2000 kW were simulated, in order to characterize the capacity factor (FC). The results bring in general information on the use of wind to produce electricity in Cuba, attending to different physical-geographical conditions.

**Keywords:** Wind energy, meteorological towers, wind measurement, capacity factor

## **Introducción**

La energía eólica ha constituido en los últimos años la fuente renovable de más rápido crecimiento en el mundo, motivado en gran medida por el estado de madurez de su tecnología, la cual se encuentra ampliamente difundida, con precios del kWh competitivos con respecto a las fuentes convencionales, las cuales, al mismo tiempo, se encuentran en plena etapa de agotamiento, con el consiguiente incremento de los precios del petróleo. Esto ha motivado que países como Cuba hayan tenido la necesidad de impulsar la aplicación y desarrollo de las fuentes renovables de energía, y en especial la eólica.

Por tal motivo, hace aproximadamente dos años fue creado el Grupo Eólico Nacional con el objetivo de establecer e implementar todas las acciones necesarias para la aplicación de la energía eólica.

Como parte de este grupo de acciones se creó, a propuesta del Instituto de Meteorología (INSMET), la Red de Torres Meteorológicas de Referencia, con el objetivo principal de monitorear el viento hasta a la altura de 100 m en diferentes condiciones físico-geográficas del país, permitiendo hacer una mejor estimación del recurso eólico y proporcionar una información confiable para la elaboración de pronósticos meteorológicos a corto plazo.

La creación de esta Red se realizó bajo la concepción de establecer torres de gradiente, de amplio uso en los estudios micrometeorológicos de la capa superficial atmosférica (CSA) (~100 m de altura sobre la superficie terrestre), cuyas mediciones no se limitan únicamente a la medición de la rapidez y dirección del viento, sino también a la de otras variables meteorológicas, como temperatura, humedad y presión en distintos niveles dentro de la propia capa superficial atmosférica.

Por tal motivo, el objetivo de este trabajo es mostrar las características de esta Red y proporcionar un estudio preliminar del viento a partir de la información registrada en la misma, incluyendo la información energética para el sitio.

## Materiales y métodos

La conformación de la Red se hizo atendiendo a la poca variabilidad del viento en el nivel de 1 000 hPa para Cuba, según los datos de reanálisis para el período 1971-2000 [NCEP/NCAR, 2007], y por tanto no era necesario un número voluminoso de torres para caracterizar la capa superficial, sino sólo cubrir aquellas zonas que por sus características geográficas, topográficas y climáticas fueran las más representativas para nuestro país. Especial atención se brindó a las regiones montañosas, donde los modelos resultan ser bastante inexactos a la hora de estimar o predecir cualquier variable.

De particular importancia es el equipamiento empleado para conformar la Red, la que está compuesta por sensores de medición de respuesta rápida que operan en alta frecuencia, suficiente para estudiar los fenómenos meteorológicos de menor escala que ocurren en el interior de la CSA.

Niveles de medición en las torres y características de los sensores de medición

Las variables que se miden en cada una de las torres son las siguientes: rapidez (FF) y dirección del viento (DD), temperatura (T), humedad (H) y presión (P). Detalles de la ubicación de los niveles en las torres se muestran en la tabla 1.

Todas las observaciones se realizan cada 10 minutos y son registrados en un equipo compilador de datos y enviados a la sede del INSMET vía GSM, donde son almacenados, validados y guardados en formato de base de datos.

*Tabla 1. Niveles de medición de las torres seleccionadas*

| Torres                      | Niveles de medición, m |        |        |              |              |              |
|-----------------------------|------------------------|--------|--------|--------------|--------------|--------------|
|                             | 10                     | 30     | 50     | 60           | 75           | 100          |
| Guanito TV, Pinar del Río   | FF, DD, T, H, P        | FF, DD | FF, DD |              | FF, DD, T, H |              |
| Santa Cruz Norte, La Habana | FF, DD, T, H, P        | FF, DD |        | FF, DD, T, H |              |              |
| COCC Jagüey, Matanzas       | FF, DD, T, H, P        | FF, DD |        | FF, DD, T, H |              |              |
| El Brinco, Matanzas         | FF, DD, T, H, P        | FF, DD | FF, DD |              |              | FF, DD, T, H |

|                                 |                 |        |        |              |  |              |
|---------------------------------|-----------------|--------|--------|--------------|--|--------------|
| Caibarién, Villa Clara          | FF, DD, T, H, P | FF, DD | FF, DD |              |  | FF, DD, T, H |
| Camagüey TV, Camagüey           | FF, DD, T, H, P | FF, DD | FF, DD |              |  | FF, DD, T, H |
| Cueva Arriba, Guantánamo        | FF, DD, T, H, P | FF, DD | FF, DD |              |  | FF, DD, T, H |
| Punta Tabacal, Santiago de Cuba | FF, DD, T, H, P | FF, DD |        | FF, DD, T, H |  |              |

La ubicación de las torres que conforman la red se muestra en la figura 1.



Fig. 1. Red de Torres meteorológicas de Referencia.

### Caracterización del viento

Atendiendo a que el montaje de la Red se realizó de manera progresiva, no todas las torres cuentan con el mismo período de medición, por tal motivo se muestran solamente los resultados de cinco de las doce torres de referencia: Guanito TV, Santa Cruz del Norte, Caibarién, Camagüey TV y Punta Tabacal.

Los datos registrados en esas torres permitieron calcular el valor medio mensual de la rapidez del viento para cada uno de los niveles, el rumbo y dirección del viento en el primer y último niveles (aunque por razones de

espacio sólo se muestra el último nivel), los que permitieron la construcción del perfil vertical del viento y la determinación de su exponente alfa, la oscilación diurna y anual, y la distribución de frecuencia del viento (con el objetivo de conocer el porcentaje de casos que está por encima de los 4 m/s, generalmente la velocidad de arranque de los aerogeneradores), y el ajuste con la distribución Weibull [OMM, 1984], la cual ya había sido comprobada para nuestro país [Soltura, et al., 1997].

El exponente  $\alpha$  de la Ley de potencia del viento [Haltiner y Martin, 1957], se obtiene a partir de la expresión (1):

$$\alpha[\text{a dim}] = \frac{\ln\left[\frac{\bar{V}(Z_2)}{\bar{V}(Z_1)}\right]}{\ln\left[\frac{Z_2}{Z_1}\right]} \quad (1)$$

Donde:

$Z_1$  y  $Z_2$ : Alturas.

$\bar{V}(Z_1)$  y  $\bar{V}(Z_2)$ : Velocidades medias resultantes de las mediciones en  $Z_1$  y  $Z_2$ .

*Distribución de Weibull  $f(u)$ :*

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right) \quad (2)$$

Donde:

$A$ : Parámetro de escala.

$k$ : Parámetro de forma.

### Cálculo de $u^*$ y $Z_0$

Para el cálculo de la velocidad de fricción ( $u^*$ ) y del parámetro de rugosidad  $Z_0$ , se ajustó la Ley del perfil logarítmico del viento a la ecuación de una línea recta, de la forma siguiente:

$$Y = AX + B$$

Donde:

$A = k/u^*$ : Pendiente de la recta.

$B = \ln(Z_0)$ : Intercepto. Utilizando los valores del perfil vertical del viento para los distintos niveles de medición, se calcularon estos parámetros para los 16 rumbos del viento, lo que permitió obtener una curva de ajuste de dependencia de  $Z_0$  con  $u^*$ , para cada uno de los sitios donde se encuentran enclavadas las torres.

## Cálculos energéticos

Las variables que se calcularon a partir de la información proporcionada por las torres y la información de la curva de potencia de varios aerogeneradores comerciales con potencias entre 275 kW y 2 MW, y utilizando como modelo de cálculo el modelo de microescala WAsP [Petersen y Troen, 1986], fueron la densidad de potencia del viento, la producción mensual de energía y el factor de capacidad. *Densidad de potencia (P)*:

$$P[\text{Watt} / \text{m}^2] = \frac{1}{2} \rho \overline{V^3} \quad (3)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del aire, cuyas unidades se expresan, en  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\overline{V^3}$ : Media del cubo de la velocidad del viento, medida en un sitio dado.

*Factor de capacidad FC[%]*

$$FC[\%] = \frac{EPT[\text{MWh}]}{EPT_{\text{CAP.NOMINAL}}[\text{MWh}]} * 100 \quad (4)$$

Donde:

$EPT[\text{MWh}]$ : Energía producida por la turbina.

$EPT_{\text{CAP.NOMINAL}}[\text{MWh}]$ : Energía producida por la turbina a su capacidad nominal.

Toda la información se muestra en gráficos y tablas que facilitan su comprensión.

## Análisis de los resultados

*Perfil vertical del viento*

El comportamiento del perfil vertical medio del viento, presenta características similares para todos los sitios estudiados (Fig. 2), confirmando el perfil logarítmico del viento [Haltiner y Martin, 1957], resultado que ha sido confirmado en otras regiones del mundo [Hsu, 1982].

Sin embargo, debe notarse que la torre de Punta Tabacal muestra los valores de rapidez del viento más bajos entre todos los perfiles, con la particularidad, además, de que los valores de los niveles 30 y 60 m son muy similares.

De igual manera, resulta significativo el perfil obtenido para el mes de marzo, en que ocurrieron los valores más altos de la rapidez del viento, excepto en Camagüey TV, donde los valores del mes de enero fueron

ligeramente superiores. Este comportamiento del perfil se correspondió con el comportamiento del viento a escala sinóptica (Figs. 2 y 3). La figura muestra que los valores de rapidez del viento para marzo de 2007 superan entre 3 y 4 m/s los valores históricos para ese mes.

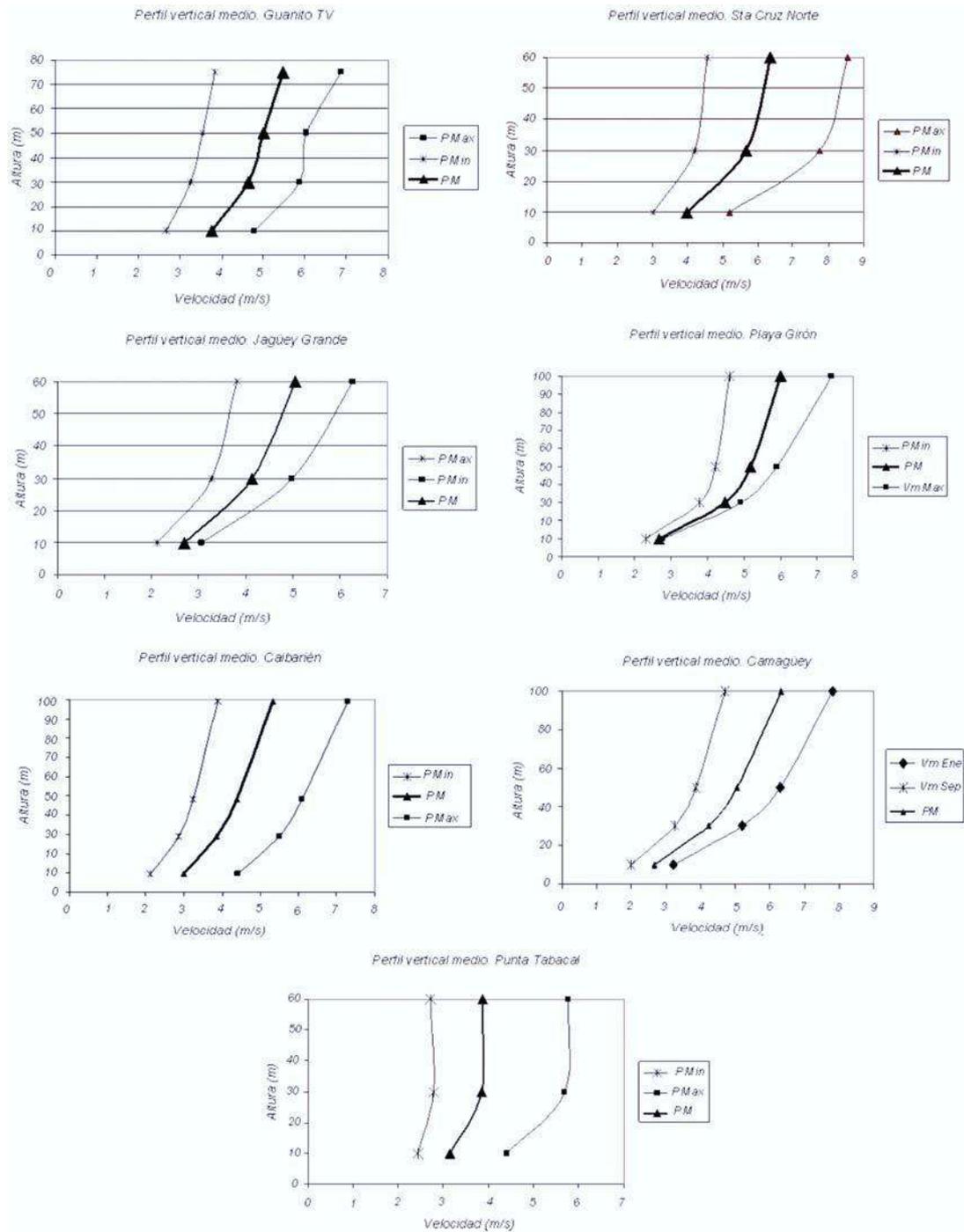
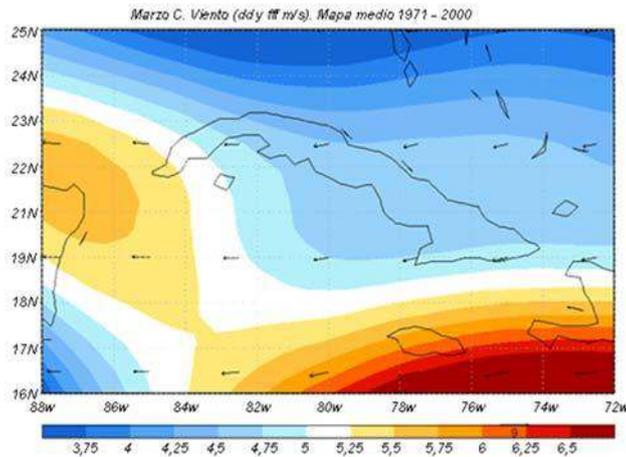
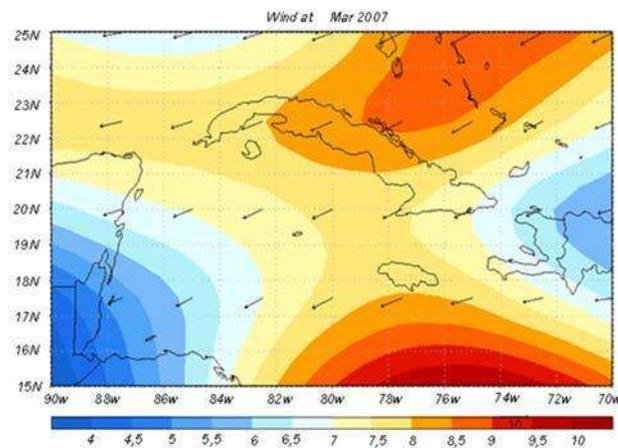


Fig. 2. Comportamiento del perfil vertical medio del viento para las estaciones seleccionadas



a)



b)

*Fig. 3. Comportamiento del viento en el nivel de 1 000 hPa para el mes de marzo: a) Período 1971-2000; b) Año 2007.*

En general, para todos los meses, los perfiles se correspondieron con el comportamiento del viento a escala sinóptica. Los valores mínimos se presentaron durante los meses de junio y julio.

Vinculado a este comportamiento, se calculó el exponente alfa del perfil logarítmico del viento (Tabla 2), cuya importancia radica en poder calcular el valor de la rapidez del viento en cualquier nivel dentro de la capa superficial, a partir del valor en el nivel de 10 m [Hsu, 1982]. Los resultados muestran que este valor fue mayor en la torre de Camagüey TV, mientras el menor se obtuvo en la torre de Punta Tabacal. Hay que señalar que este valor sufre variaciones de mes a mes y por hora, por lo que es recomendable aumentar la muestra con el objetivo de mejorar su estimación. Estos valores están en correspondencia con los obtenidos por otros autores en otras regiones del mundo [Petersen y Troen, 1986].

*Tabla 2. Valor del exponente  $\alpha$  del perfil vertical para los sitios analizados*

|            |                      |        |        |           |             |               |
|------------|----------------------|--------|--------|-----------|-------------|---------------|
| Guanito TV | Santa Cruz del Norte | Jagüey | Brinco | Caibarién | Camagüey TV | Punta Tabacal |
| 0,18       | 0,26                 | 0,35   | 0,24   | 0,26      | 0,33        | 0,12          |

*Comportamiento de los valores medios mensuales de la rapidez el viento por niveles*

El comportamiento por meses de los valores medios de la rapidez del viento por niveles se muestra en la figura 4. Se muestran sólo los dos últimos niveles de cada torre, por ser los que más interesan desde el punto de vista de su aplicación como recurso energético.

En ellos se aprecia un claro comportamiento en correspondencia con la época del año. Los valores máximos se alcanzan en los meses del período invernal, o poco lluvioso. El descenso mostrado en los meses del período lluvioso está bien reflejado en el comportamiento histórico de las estaciones de superficie de la red de observaciones que comprende el Servicio Meteorológico Nacional. Los valores promedios por cada nivel se muestran en la tabla 3.

*Tabla 3. Valores promedios por nivel de la rapidez del viento para las torres seleccionadas*

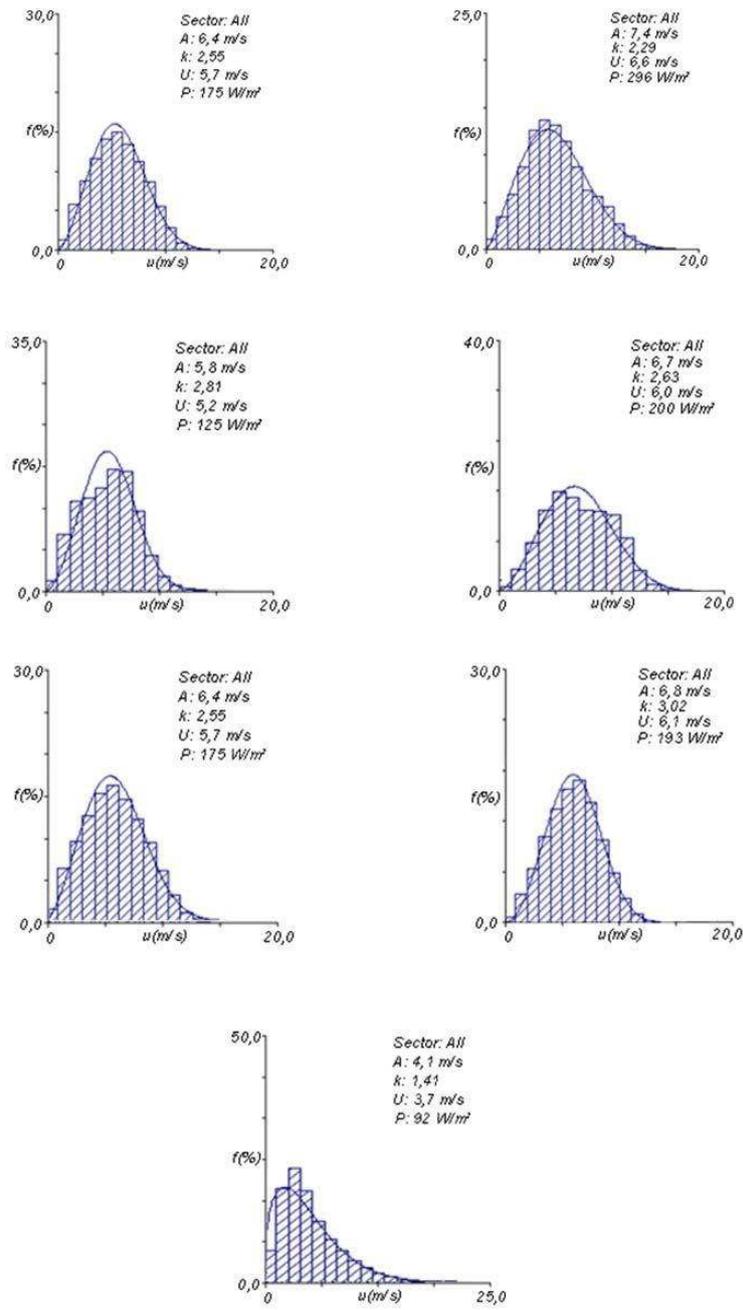
| Nivel, m | Guanito* | Santa Cruz del Norte** | Jagüey | El Brinco | Caibarién | Camagüey | Punta Tabacal** |
|----------|----------|------------------------|--------|-----------|-----------|----------|-----------------|
| 10       | 3,8      | 4,0                    | 2,7    | 2,7       | 3,0       | 2,6      | 3,1             |
| 30       | 4,7      | 5,7                    | 4,1    | 4,5       | 3,9       | 4,2      | 3,8             |
| 50       | 5,0      | 6,4                    | 5,0    | 5,2       | 4,4       | 5,1      | 3,9             |
| 100      | 5,5      |                        |        | 6,0       | 5,4       | 6,3      |                 |

\* Último nivel de medición: 75 m.

\*\* Último nivel de medición: 60 m. Resultan llamativos los valores promedios para Santa Cruz del Norte, tanto en 30 como en 60 m, confirmando a este sitio como muy prometedor para el aprovechamiento de la energía eólica.

*Distribución de frecuencia de la rapidez del viento y el ajuste de la Distribución Weibull.*

En este trabajo sólo se muestran, por su importancia para la aplicación de la energía eólica, los resultados correspondientes al último nivel de cada torre



(Figs. 5-11). Fig. 5. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Guanito TV. Fig. 6. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Santa Cruz del Norte. Fig. 7. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Jagüey. Fig. 8. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en El Brinco. Fig. 9. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Caibarién. Fig. 10. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Camagüey. Fig. 11. Ajuste de Weibull para la distribución de frecuencia del viento en Punta Tabacal.

### Cálculo de $u^*$ y $Z_0$

Haciendo uso del perfil logarítmico del viento, y mediante un ajuste realizado por la ecuación de la línea recta, se determinó para cada sitio un ajuste potencial que relaciona ambos parámetros y cuyo coeficiente de correlación, a excepción de Punta Tabacal, fue superior a 0,85 en casi todos los casos. Las curvas, así como las ecuaciones de ajustes para cada sitio, se muestran en las figuras 12-18:

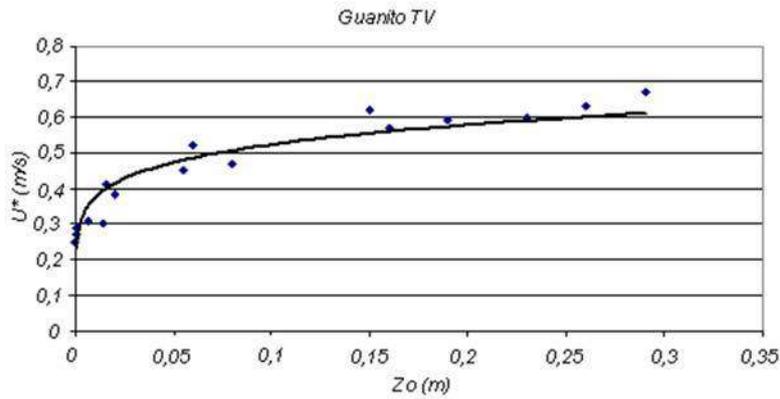


Fig. 12. Relación  $Z_0$  vs.  $u^*$  para la estación de Guanito TV.

$$Y = 0,7302 X^{0,14448}$$

$$R_2 = 0,9044$$

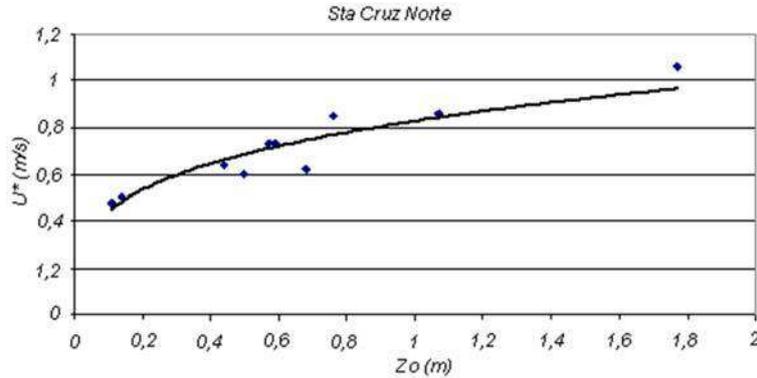


Fig. 13. Relación  $Z_0$  vs.  $u^*$  para la estación de Santa Cruz del Norte.

$$Y = 0,8276 X^{0,2728}$$

$$R_2 = 0,8612$$

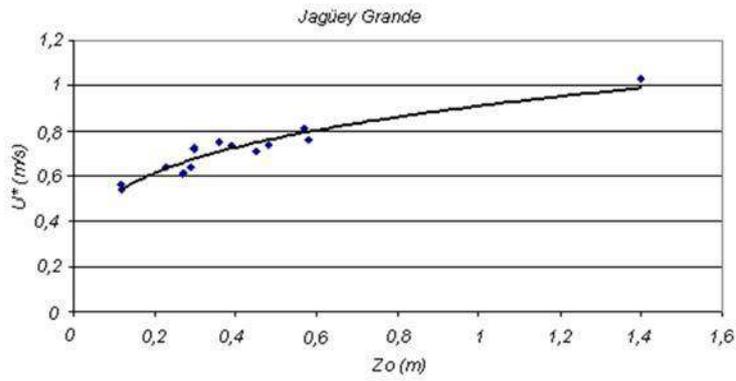


Fig. 14. Relación  $Z_o$  vs.  $u^*$  para la estación de Jagüey Grande.

$$Y = 0,9099 X^{0,2466}$$

$$R_2 = 0,9274$$

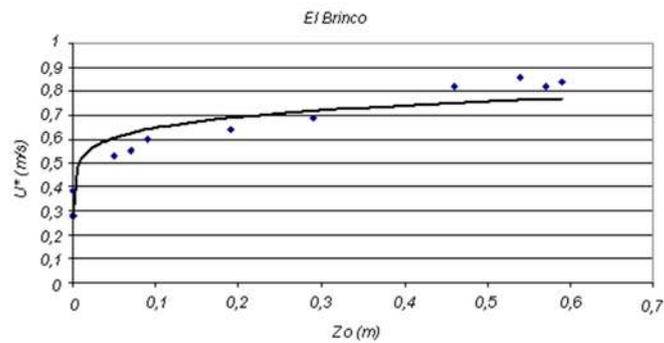


Fig. 15. Relación  $Z_o$  vs.  $u^*$  para la estación de El Brinco

$$Y = 0,8099 X^{0,0972}$$

$$R_2 = 0,9532$$

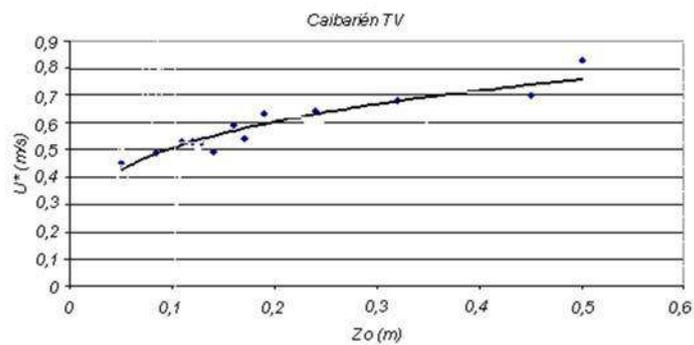


Fig. 16. Relación  $Z_o$  vs.  $u^*$  para la estación de Caibarién

$$Y = 0,9011 X^{0,2522}$$

$$R_2 = 0,8771$$

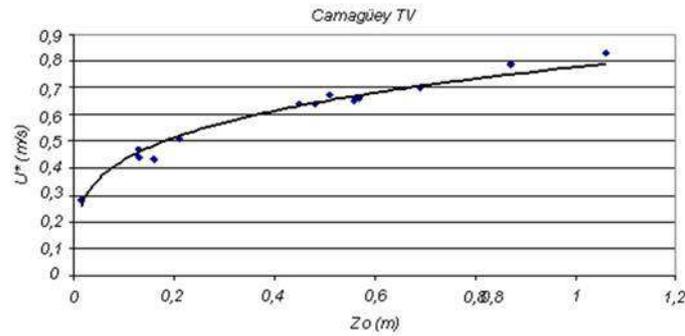


Fig. 17. Relación  $Z_0$  vs.  $u^*$  para la estación de Camagüey.

$$Y = 0,7768 X^{0,2585}$$

$$R_2 = 0,974$$

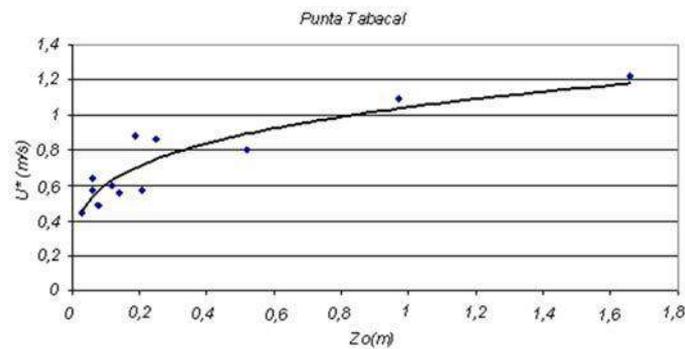


Fig. 18. Relación  $Z_0$  vs.  $u^*$  para la estación de Punta Tabacal.

$$Y = 1,0444 X^{0,2403}$$

$$R_2 = 0,7979$$

De las ecuaciones se aprecia que el mejor ajuste se encontró para la torre de Camagüey (0,97), y el más bajo para la torre de Punta Tabacal (0,8).

#### Cálculos energéticos

Las figuras 19 y 20 muestran el comportamiento en el período del FC y la energía producida para cada sitio. Para este análisis se simularon varias máquinas comerciales (Tabla 4), incluyendo las que componen el parque eólico de la Isla de Juventud (Vergnet) y el Gibara 1 (Gamesa).

Tabla. 4. Tipos de máquinas empleadas para la simulación de los sitios

| Tipo de máquina   | Velocidad de arranque, m/s | Potencia nominal, kW |
|-------------------|----------------------------|----------------------|
| Vergnet MP 32/275 | 4                          | 275                  |
| Gamesa G52        | 4                          | 850                  |

|            |   |       |
|------------|---|-------|
| Neg-Mikon  | 4 | 900   |
| Bonus      | 4 | 1 000 |
| Nordex N60 | 4 | 1 300 |
| Vestas V80 | 4 | 2 000 |

Puede apreciarse que el aprovechamiento energético del viento en Cuba está muy estrechamente vinculado a su comportamiento estacional, siendo la temporada invernal (noviembre-abril), donde deben esperarse los mayores aportes de este recurso al Sistema Electroenergético Nacional.

Los resultados alcanzados hasta el presente aseveran la afirmación anterior, especialmente en la región de Santa Cruz del Norte, donde incluso en el mes de marzo se alcanzaron valores de FC de más de 50% para todas las máquinas simuladas, valores realmente excepcionales para cualquier lugar del mundo, aún teniendo en cuenta el comportamiento anómalo de este mes durante el 2007

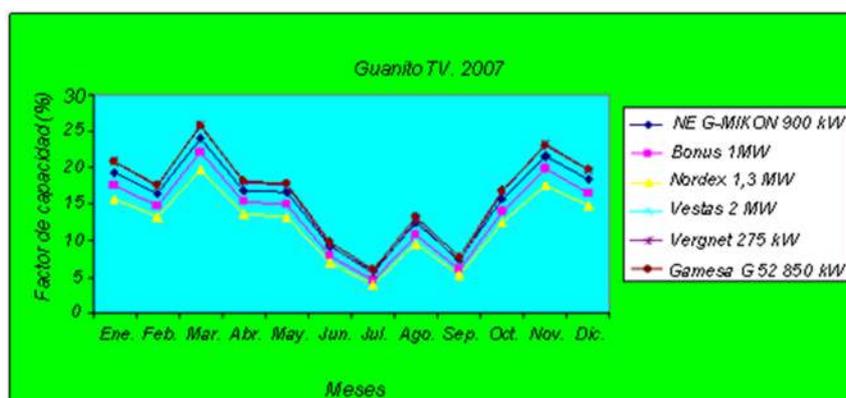


Fig. 21. Comportamiento anual del factor de capacidad Guanito.

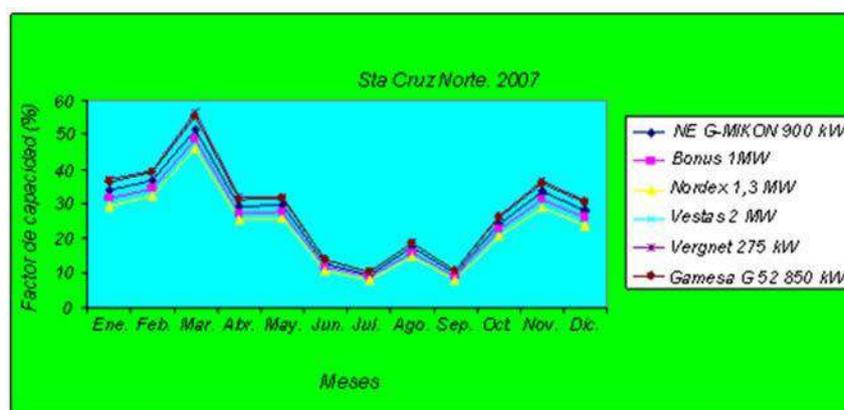


Fig. 22. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en Santa Cruz del Norte.

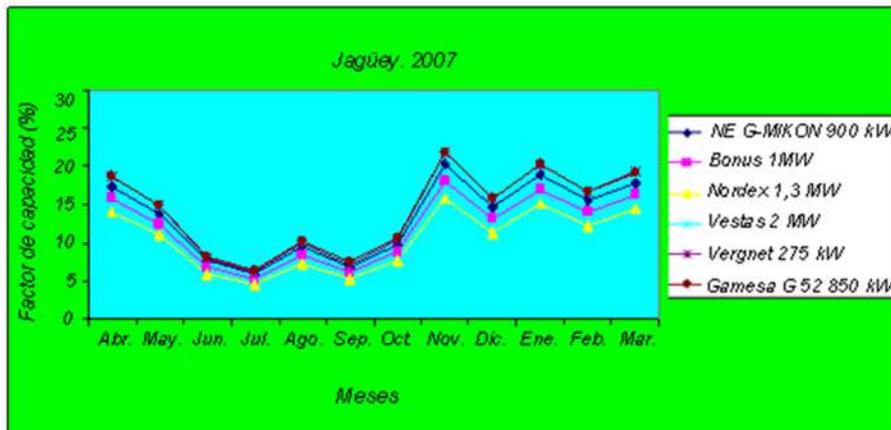


Fig. 23. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en Jagüey Grande.

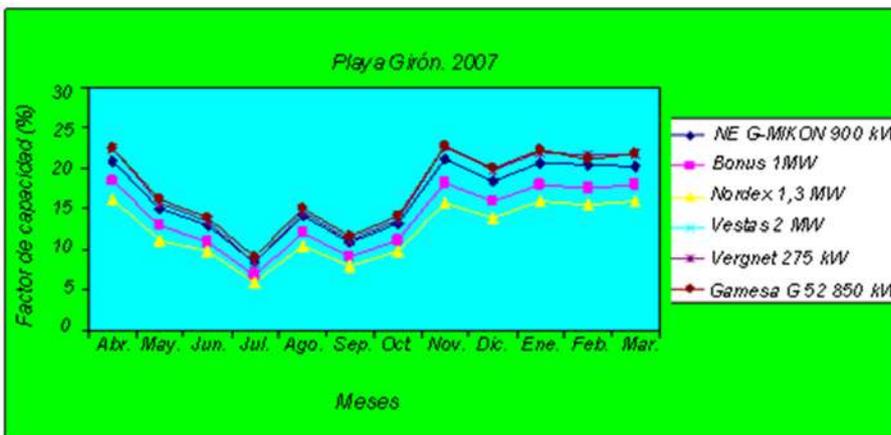


Fig. 24. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en (FC) en El Brinco.

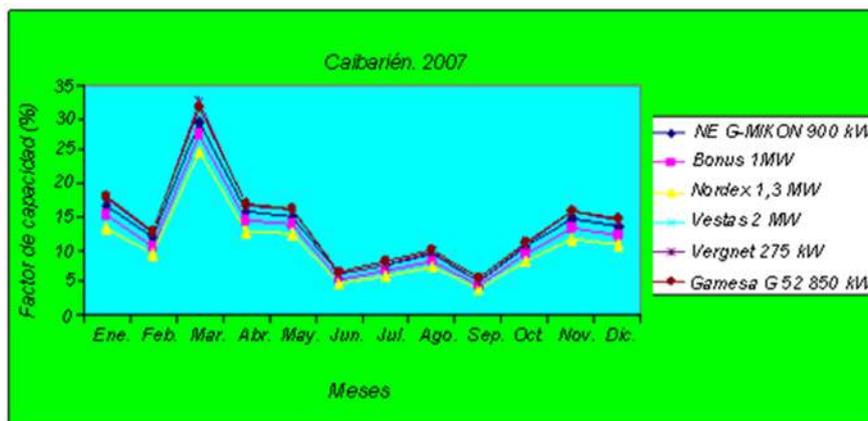


Fig. 25. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en Caibarién TV.

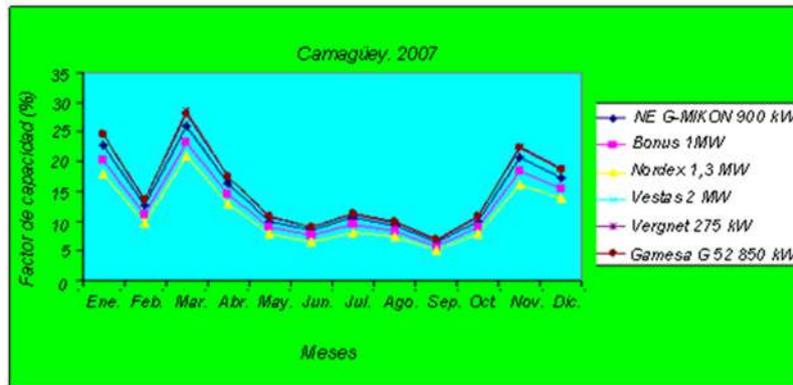


Fig. 26. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en Camagüey TV.

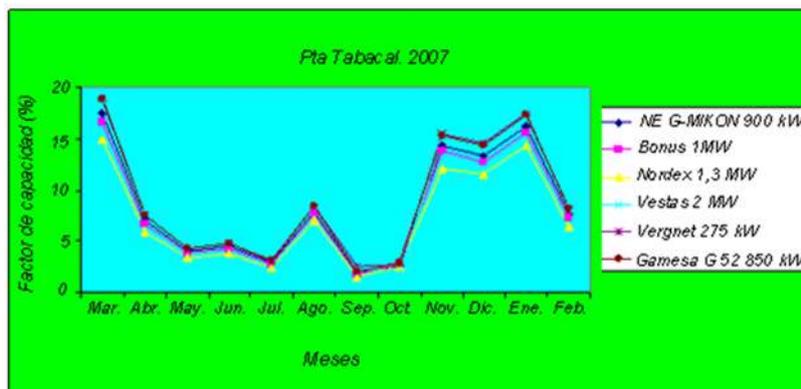


Fig. 27. Comportamiento anual del factor de capacidad (FC) en Punta Tabacal.

## Conclusiones

Los resultados mostrados en este trabajo, aunque preliminares, muestran la importancia de la red de torres de referencias para el programa eólico cubano, que contribuye de manera notable al monitoreo del viento como recurso energético en todo el país, y que permite complementar la actividad de prospección que simultáneamente se lleva a cabo en varios puntos del país. Entre las principales conclusiones, están:

1. El comportamiento del viento a escala sinóptica en el nivel de 1 000 hPa está siendo bien representado por las torres de referencia.
2. La medición de las variables meteorológicas principales en varios niveles permiten el conocimiento de los parámetros que caracterizan la capa superficial atmosférica, y contribuirá a la confirmación de las parametrizaciones que hoy en día se utilizan en el mundo, o la formulación de otras nuevas acorde con nuestras condiciones físico-geográficas.

3. Los datos de viento reportados por las torres en el período de medición, han seguido las variaciones que climatológicamente están reportadas por las estaciones meteorológicas de superficie. Los meses de marzo y agosto presentaron anomalías positivas en cuanto a los valores históricos de rapidez del viento mostrados por los datos de reanálisis del período 1970-2000.
4. El ajuste de la distribución de frecuencias del viento por la distribución de Weibull, fue muy bueno, con una desviación máxima de 3%, aunque en casi todos los casos estuvo por debajo de 1%.
5. Se pudo encontrar con buena aproximación la relación entre  $Z_0$  y  $u^*$ , para todos los sitios, lo cual contribuirá a obtener una ecuación generalizada para todo el país, teniendo en cuenta las diferentes condiciones físico-geográficas y climatológicas.¶6. Respecto a los resultados obtenidos, la región de Santa Cruz del Norte muestra hasta el presente los valores más notables para el aprovechamiento energético del viento, con factores de capacidad que en la etapa invernal sobrepasan 30%, valor altamente competitivo.
6. La simulación combinada de varias máquinas para un mismo sitio permite la comparación en cuanto a sus rendimientos, y se sugiere ir incorporando al análisis aquellas máquinas que formarán parte de los futuros parques eólicos de Cuba.
7. Todos los resultados expuestos aquí resultan ser novedosos para Cuba.

## Bibliografía

- HALTINER G. Y F. MARTIN (1957). *Meteorología Dinámica y Física*. New York, Londres, Toronto: McGraw Hill Book Company S.A., 1957.
- Hsu, S. A. (1982). «Determination of the Power Law Wind Profile Exponent on Tropical Coast», in *L. Appl. Meteor.*, 21, no. 8, 1167-1190 pp.
- NCEP/NCAR (2007). Datos de reanálisis obtenidos del sitio Web: [www.ncep.noaa.gov](http://www.ncep.noaa.gov).
- OMM (1984). *Aspectos meteorológicos de la utilización del viento como fuente de energía. Nota Técnica no. 175*. OMM-No. 575. Ginebra, Suiza, 1984.
- PETERSEN, E. L. Y I. TROEN (1986). *European Wind Atlas*. European Wind Energy Association, Conference and Exhibition, Roma, Italy, 1986.
- SOLTURA, R.; S. MON, G. RODRÍGUEZ, A. ROQUE Y L. AYALA (1997). «Atlas Eólico de Cuba. Estadística y climatología. Potenciales de generación eolo-eléctrico y bombeo eólico, en *Revista Solar*, no. 33. Primavera, México, 1997.

## **Sistemas de información geográfica y su aplicación en los proyectos de electrificación rural**

### **Geographic information systems and their application in rural electrification projects**

*Por M.Sc. Ciaddy Gina Rodríguez Borges\* y Dr. Antonio Sarmiento Sera\*\**

*\* Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC), Cabimas, Venezuela.*

*\*\* Doctor en Ciencias y Profesor Titular del Instituto Superior Politécnico*

*José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba.*

*e-mail: ciaddyrodriguez@yahoo.es y sarmiento@ceter.cujae.edu.cu*

#### **Resumen**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son en la actualidad una valiosa herramienta de análisis geoespacial y de cálculo matemático, que ha empezado a ser usada en los proyectos de electrificación rural, en distintas fases de los mismos; ya no sólo en la estimación del potencial de los recursos energéticos de una región, sino también ganando espacio en la fase de selección de las tecnologías más adecuadas, integrada a métodos de análisis multicriterio. De igual forma, se ha empezado a considerar la aplicación de esta herramienta para la fase posterior a la instalación y arranque de operaciones de estos sistemas energéticos de electrificación, puesto que brindan grandes ventajas para el seguimiento de operaciones y mantenimiento de los mismos. El objetivo del presente trabajo es valorar el conjunto de ventajas que representa el empleo de los SIG en los proyectos de electrificación rural, mediante un ejemplo en una región rural (municipio Mara, Venezuela) de nuestra América, que, al igual que otras, ameritan la evaluación de sus posibilidades de electrificación.

**Palabras clave:** Electrificación rural, sostenibilidad, fuentes renovables de energía, SIG

#### **Abstract**

The Geographic Information Systems (GIS) are currently a valuable tool for geospatial analysis and mathematical calculation, which has begun to be used in different phases in rural electrification projects, not only in the estimation of the potential of the energy resources of a region, but also in the selection phase of the most suitable technologies, integrated to multicriteria analysis methods. Similarly, it has begun to consider the application of this tool for the phase following the installation and start-up of operations of these electrification projects, since they offer great advantages for the monitoring of operations and maintenance. The objective of this paper is to assess the advantages of using GIS in rural electrification

projects, through an example in a rural region (Mara municipality, Venezuela) of our America, which, like others, merit the evaluation of its possibilities for electrification.

**Keywords:** Rural electrification, sustainability, renewable energy sources, SIG

Electrificación rural, sostenibilidad, fuentes renovables de energía, SIG.

## Introducción

El proceso de electrificación rural mediante fuentes renovables de energía, ha tenido diversas orientaciones durante los últimos años, en nuestros países de Latinoamérica; algunos como ayuda internacional, como asistencialismo o como intento de creación de una barrera a las migraciones internas o externas [Fuentes y Álvarez, 2004], pasando por proyectos nacionales tendentes a suplir este importante servicio para el desarrollo de las áreas rurales. Tal es el caso de los proyectos *Luz para Todos*, de Brasil [Muñoz, 2004], y *Sembrando Luz*, de Venezuela [Corporación..., 2007], por mencionar algunos de los que actualmente siguen desarrollándose, entre otros.

En los proyectos de electrificación puede emplearse una amplia gama de fuentes renovables de energía, como la eólica, solar fotovoltaica, geotérmica, hidráulica, marítima y de la biomasa, entre otras. Las tecnologías más utilizadas hasta ahora en la electrificación rural, son los sistemas fotovoltaicos, microcentrales hidroeléctricas, aerogeneradores, biodigestores y sistemas híbridos de energía (los que de forma simultánea utilizan varias fuentes de energía, como la eólica-fotovoltaica, fotovoltaica-diésel, entre otras).

Actualmente, los proyectos de electrificación rural deben enfocarse hacia un modelo de sustentabilidad [Fuentes y Álvarez, 2004; Linares, et al., 2010], que abarque un proceso amplio desde la planificación territorial, el diagnóstico y la evaluación de alternativas y de las facilidades de gestión de los sistemas energéticos disponibles, hasta la selección de la tecnología más adecuada para la electrificación de cada comunidad [Belmonte, et al., 2009].

Deben considerarse, en la etapa de valoración de alternativas y facilidades de gestión de los sistemas energéticos (que pudieran ser instalados), la complejidad y la periodicidad de mantenimiento requerido en cada tecnología, así como otros elementos clave que incidan en la operación de los sistemas y por ende en su selección, con el fin de garantizar su funcionamiento continuo, durante el tiempo de vida útil planificado para cada sistema energético, logrando así el retorno social esperado con la inversión realizada.

El retorno social esperado en estos proyectos, visible mediante el conjunto de nuevas actividades y cambios sociales experimentados en la población beneficiaria de los mismos, puede medirse a través de las actividades socio-económicas, educativas, culturales, de organización comunal, de salubridad, entre otras, que elevan la calidad de vida y la sustentabilidad de la comunidad, y que hayan sido impulsadas a consecuencia de la incorporación del proyecto de electrificación.

A pesar de todo el esfuerzo y la complejidad que conlleva la planificación y desarrollo de estos proyectos de electrificación rural, no existe una guía metodológica orientada a definir una secuencia de pasos y procedimientos estandarizados que permitan de forma sencilla la valoración de las distintas opciones tecnológicas.

De igual forma, se carece de planteamientos definidos, en relación con las herramientas que permiten facilitar el procesamiento de los datos y análisis de las distintas variables que intervienen en los proyectos de electrificación, tal es el caso de los programas de simulación del comportamiento energético: HOMER, HOGA, Hybrid2, RETScreen, entre otros [DUFO, 2007], y de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Algunos estudios recientemente realizados, cuya finalidad era evaluar los potenciales energéticos de algunas fuentes renovables y su factibilidad de uso para la electrificación rural, han demostrado las relevantes ventajas de emplear las herramientas que brindan los SIG, como por ejemplo, las posibilidades de evaluar simultáneamente todos los recursos energéticos y efectuar comparaciones de costos entre las distintas tecnologías, determinar las mejores localizaciones para la ubicación de los sistemas energéticos, entre otras.

El empleo de los SIG permite considerar el conjunto de condiciones geográficas que afectan el rendimiento de los sistemas energéticos, así como extrapolar datos de regiones geográficas contiguas, replicar las evaluaciones energéticas en diferentes regiones geográficas con menores esfuerzos y considerando un mayor número de variables, entre otras ventajas con respecto a los métodos de cálculos tradicionales [Amador, 2000; Egido y Camino, 2008].

La idoneidad de un sistema energético de electrificación rural respecto a otros, debe ser un elemento evaluado en función del conjunto de variables participantes en el comportamiento de los sistemas energéticos (demanda energética, disponibilidad de recursos energéticos locales, tecnologías disponibles, entre otras), aunque también debe enfocarse en la visualización de la totalidad de los procesos, más allá de la instalación del sistema.

Es por ello que la orientación de los proyectos de electrificación rural debe estar dirigida al análisis integral de múltiples variables, conjugadas en una determinada localización geográfica, limitada por la cantidad de recursos energéticos disponibles y la demanda de energía existente, donde los elementos de diseño de los sistemas deben ser valorados, considerando no sólo aspectos técnicos y económicos tradicionales, sino también los ambientales y sociales que repercutirán en las comunidades donde pudieran ser instalados [Ochoa, 2009].

El objetivo del presente trabajo es valorar el conjunto de ventajas que representa el empleo de los SIG, en los proyectos de electrificación rural, durante las distintas fases de estos proyectos (estimación del potencial y necesidades energéticas, selección de la tecnología y planificación del mantenimiento de los sistemas energéticos), para garantizar una integración de los macroobjetivos de los proyectos de electrificación rural.

### **Materiales, métodos y procedimientos**

Este trabajo tuvo como antecedente el análisis de las aplicaciones que se vienen desarrollando con la herramienta de los SIG, desde hace más de una década, en proyectos dirigidos a la creación de SIG a escala regional para determinar las potencialidades de aprovechamiento de las fuentes renovables de energía (FRE). Tal es el caso de los proyectos impulsados por la Unión Europea, como por ejemplo: REGIS, EPURE, EnTRACK, REPLAN, entre otros, en los que fue muy importante el apoyo en el nivel de precisión y detalle alcanzado, gracias al empleo de los SIG en dicha planificación energética [Domínguez, 2002].

En esos proyectos, se alcanzó la fase de determinación del potencial energético de distintas áreas geográficas, determinándose cuáles son las fuentes energéticas disponibles y cuales son las más viables para su empleo, considerando diferentes aspectos. El alcance de los proyectos no contemplaba las fases posteriores de selección de la tecnología más adecuada de electrificación rural en cada región, ni las posibilidades de expandir la utilidad de los SIG diseñados, para el seguimiento y monitoreo de la continuidad de operaciones de los sistemas energéticos una vez instalados.

En la actualidad, ya se plantean, y están en diseño, propuestas dirigidas a aplicar esta herramienta, para dar seguimiento a los sistemas energéticos una vez que se instalen en las comunidades, desde el enfoque de análisis del ciclo de vida de los mismos, para poder certificar que pueda obtenerse el adecuado retorno social del proyecto, durante su vida útil.

## **Sistemas de Información Geográfica**

Los SIG pueden definirse como el conjunto de herramientas basadas en un soporte informático que maneja de forma integral datos geográficos y de diferentes índoles (parámetros y criterios), permitiendo resolver problemas geoespaciales y de cálculos matemáticos, representados en un ambiente gráfico [Amador, 2000].

La información y datos que suministran los SIG, han sido señalados por varios autores como relevantes para la toma de decisión en los proyectos de electrificación rural, así como también para los planificadores energéticos y agentes decisores [Rodríguez, et al., 2005], siendo elementos de apoyo importantes, por las facilidades que brinda para: 1) elaborar mapas temáticos (de las fuentes renovables disponibles), 2) realizar análisis y resúmenes estadísticos del comportamiento de las variables que condicionan el empleo de FRE, y 3) proporcionar datos visuales y estadísticos sobre determinada comunidad, brindando informaciones necesarias para la toma de decisiones en la electrificación rural [Domínguez, 2002; Domínguez, et al., 2009; Domínguez, et al., 2010].

Los SIG pueden suministrar un conjunto muy amplio de información a los planificadores energéticos, entre ellos, la posibilidad de realizar análisis multicriterio, en función de las necesidades de cada proyecto bajo distintos escenarios (inclusive cuando se disponen de pocos datos, facilitando el empleo de datos satelitales disponibles, a través de diferentes agencias, como por ejemplo, la NASA [Agencia NASA].

Las mayores ventajas que presenta esta herramienta son la posibilidad de realizar, bajo esquemas gráficos (a escala), cálculos y cruce de variables de relevancia para los proyectos de electrificación rural, con criterios tan disímiles como, por ejemplo, aspectos técnicos, ambientales, económicos y sociales, que deben ser considerados cuando se trata de sistemas autónomos de electrificación rural [Ochoa, 2009].

A diferencia de la electrificación convencional mediante una red de distribución eléctrica, cuyas variables son en su mayoría cuantificables y deterministas, las variables intervinientes en los proyectos que emplean fuentes renovables de energía, dependen de elementos cuya cuantificación no es sencilla, por lo que amerita involucrar modelos y herramientas matemáticas de carácter probabilístico (por lo que se requiere considerar distintos escenarios), entrelazando múltiples variables y criterios en función de los objetivos que persiga dicho proyecto.

A continuación se mencionan algunas de las formas en que los SIG participan en diversas fases de los proyectos de electrificación.

### *Modelización del territorio*

Comprende el desarrollo de un modelo conceptual del territorio, donde se incluye un conjunto de datos que permita representar la realidad geográfica del área de estudio (hidrografía, vías de comunicación, altimetría, toponimia, uso de la tierra, límites administrativos, redes eléctricas, densidad demográfica, entre otros), necesarios para realizar análisis geográficos y cálculos para la estimación de los potenciales energéticos de cada una de las fuentes renovables a considerar, y de la demanda energética.

Esta fase resulta sumamente valiosa para el diseño de los proyectos de electrificación, puesto que deja abiertas las posibilidades de continuar integrando más datos, para otras comunidades inmersas o aledañas al área de estudio (que no puedan ser contempladas inicialmente), para el desarrollo regional de otros proyectos, así como también para la integración del proyecto a un ámbito nacional, aportando valiosa información.

La carencia de información cartográfica y de información digital en las regiones rurales, es una de las mayores limitantes para el empleo de los SIG en la modelación del territorio con fines energéticos; sin embargo, en la actualidad los sistemas satelitales disponibles en la red de Internet permiten obtener datos gratuitos, en cuanto a modelos digitales de terreno, datos satelitales de recursos energéticos, censos de población y vivienda, imágenes satelitales de algunas regiones, entre otros elementos necesarios para los proyectos energéticos.

Las posibilidades de empleo de los datos de diversas fuentes, aunadas a la facilidad de efectuar correcciones y aplicar modelos matemáticos de los SIG, que ya han sido desarrollados para diferentes fuentes de energía (como por ejemplo, la estimación de la irradiación solar promedio diaria, mediante el modelo desarrollado por Fu y Rich [2000], el cual ya se encuentra listo para ser empleado con este fin, de forma sencilla, en algunos programas de SIG), permite salvar en muchos casos errores de precisión de los datos disponibles de mediciones terrestres o satelitales.

Por otra parte, algunos países de Latinoamérica cuentan ya con infraestructura de datos espaciales (IDE), tales como las desarrolladas por los países miembros de la Alianza Bolivariana para los pueblos de Nuestra América (ALBA), que están siendo desarrolladas en este tipo de portales [IDEALBA, 2009], lo que facilitará aún más el acceso de la información digital de las regiones rurales, haciendo viable en el corto plazo el empleo de SIG en casi todos los proyectos de electrificación rural.

### *Estimación del potencial energético*

La estimación del potencial energético es quizás la aplicación de los SIG que más se ha explotado en el ámbito del aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, partiendo de diferentes bases de información y niveles de precisión de los datos, como, por ejemplo, partiendo de mapas de recursos solares o eólicos, para estimación del potencial energético, que pueden brindar los sistemas fotovoltaicos o parques eólicos en una región geográfica.

En los casos de regiones que no cuentan con mapas de recursos (eólicos, solares, de biomasa, entre otros), los SIG permiten la estimación del potencial de cada una de las fuentes de energía, a partir de registros terrestres o de datos satelitales, aplicando modelos digitales de terreno a la capa base de los SIG, y empleando modelos matemáticos de estimación del recurso; tal es el caso de la metodología empleada en Bolivia para la determinación de su mapa solar [Lucano y Miranda, 2008]. También resulta posible estimar las demandas energéticas de comunidades sin servicio y las distancias más cercanas para la extensión de red (datos importantes en los proyectos de electrificación) [Amador, 2000].

### *Selección de la tecnología más adecuada para la electrificación*

De forma reciente se ha contemplado el empleo de SIG en la selección de las tecnologías más adecuadas para la electrificación de comunidades rurales; un ejemplo de esto lo constituye el programa desarrollado por el CIEMAT (Centro de Investigación Energéticas Medioambientales y Tecnológicas, de España) para facilitar la toma de decisión en cuanto a la selección de la tecnología de electrificación más apropiada para una comunidad o región, denominado INTIGIS [Domínguez, et al., 2009].

El programa INTIGIS, partiendo de un conjunto de capas de un SIG, permite la valoración de tecnologías, tales como sistemas fotovoltaicos individuales, sistemas eólicos individuales, diésel individual, diésel centralizado, extensión de red convencional y sistemas híbridos eólico-diésel, lo que representa un apoyo importante en la toma de decisión, siendo una de las restricciones de este programa, el empleo de un criterio exclusivo; tal es el caso del económico (menor costo de la energía) para la selección de la mejor opción dentro de las propuestas [Domínguez, 2002].

La posibilidad que brindan los SIG de involucrar un conjunto mayor de aspectos para la selección de la tecnología, abre la alternativa de seguir incorporando métodos, como el análisis multicriterio [MODERGIS, 2010], y otras herramientas que complementen la capacidad de análisis para la determinación de las mejores opciones de electrificación rural mediante SIG.

### *Gestión de operación diaria y mantenimiento*

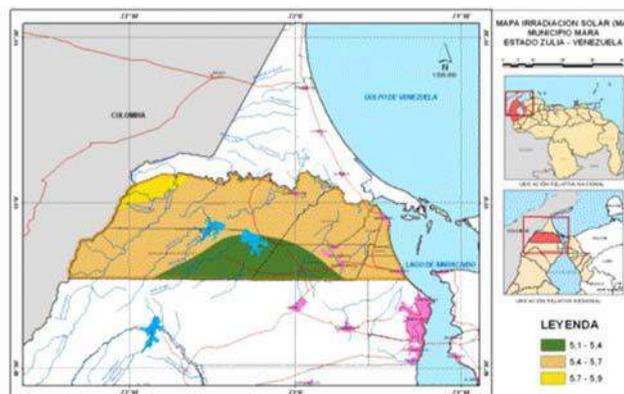
Las instalaciones y sistemas de electrificación rural ameritan contar con una gestión diaria para garantizar su operación adecuada, así como de planes de mantenimiento preventivos y predictivos, con el propósito de garantizar la continuidad de las operaciones de estos sistemas en el tiempo, y el retorno del beneficio social esperado con los mismos [Díaz, 2003; Muñoz, 2004].

Resulta de mucha utilidad el empleo de SIG en la fase de operación del sistema energético, debido al número y dispersión de las instalaciones energéticas que pueden encontrarse en algunas regiones o países, con las diferentes fechas de instalación, y por ende, con necesidades de mantenimiento también distintas, cuyo seguimiento manual es de muy difícil control.

### **Análisis y discusión de resultados**

Con el objetivo de ilustrar todas las ventajas señaladas dentro del ámbito de aplicación de los SIG en el campo de las FRE, se ha procedido a seleccionar una región geográfica de Venezuela, ubicada en la región conocida como Guajira Venezolana, específicamente en el municipio Mara (coordenadas geográficas: 10° 86' latitud Norte y 72° 48' longitud Oeste), en el cual se amerita contemplar la posibilidad de empleo de tecnologías de FRE, en algunas áreas que no cuentan con red eléctrica.

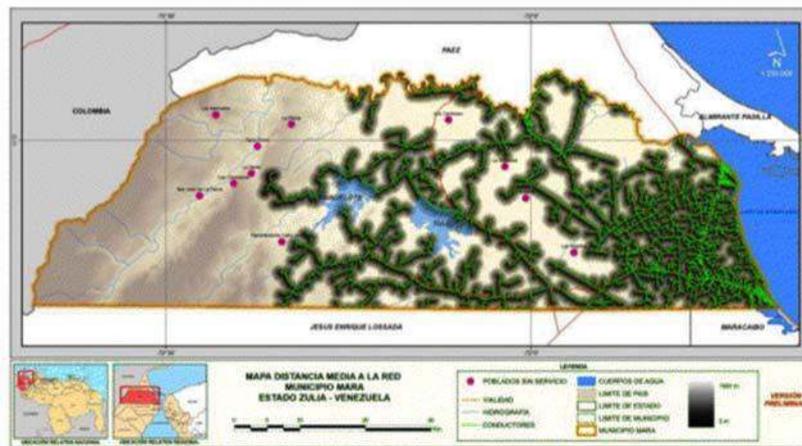
A continuación se muestra un mapa elaborado para la estimación del recurso solar en el municipio Mara, considerando el empleo de sistemas fotovoltaicos (Fig. 1).



*Fig. 1. Mapa de irradiación solar promedio diaria del municipio Mara. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NASA, interpolación mediante el método Kriging y aplicando el modelo de Fu y Rich.*

De igual forma se modelaron en el SIG un mapa eólico (preliminar) y otro de comunidades sin servicio eléctrico (con sus respectivas demandas energéticas) y su distanciamiento de la red eléctrica más cercana, lo cual brinda una valiosa información para evaluar la viabilidad de empleo de las fuentes renovables de energía disponibles.

En la figura 2 se muestra la distribución de la red eléctrica en el municipio y las comunidades sin servicio eléctrico del área de estudio.

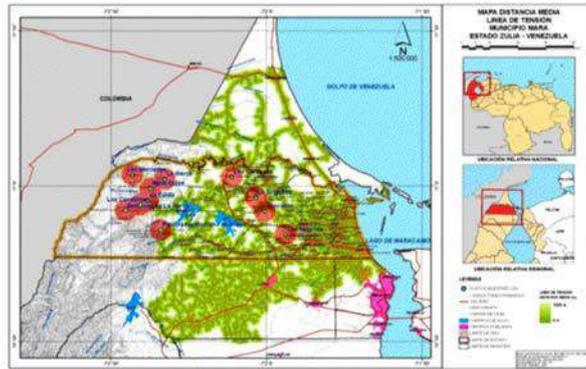


*Fig. 2. Mapa de la red eléctrica de las comunidades sin servicio eléctrico del municipio Mara.*

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos suministrados por la empresa distribuidora del servicio eléctrico.*

Posterior a esta fase de estimación del potencial energético, se realizó un análisis para determinar la viabilidad del empleo de las FRE, mediante la evaluación integral (diferentes capas de información del SIG), que contempló también las áreas circundantes a las comunidades sin servicio eléctrico, empleando varios tipos de análisis disponibles en esta herramienta, llegándose a determinar lo más viable desde el punto de vista técnico, económico, ambiental y social, si el empleo de fuentes renovables, o las convencionales.

En la figura 3 se muestran los radios perimetrales realizados para analizar los recursos energéticos disponibles en las comunidades y las distancias a la red.



*Fig. 3. Mapa del radio de potencialidades energéticas de las comunidades sin servicio eléctrico del municipio Mara. Fuente: Elaboración propia.*

Mediante esta herramienta, se pudo corroborar que la tecnología de sistemas híbridos eólico-fotovoltaico-diésel, es la más adecuada para el conjunto de áreas geográficas estudiadas, siendo este un dato muy importante, ya que estos sistemas han sido instalados en municipios cercanos al área de estudio y forman parte de las tecnologías que están siendo usadas como alternativa de electrificación rural en Venezuela, por lo que un análisis de esta naturaleza permite tener un mayor nivel de confianza antes de su instalación. En la figura 4 se muestra un ejemplo de la tecnología de sistemas híbridos eólico-fotovoltaico-diesel mencionada.



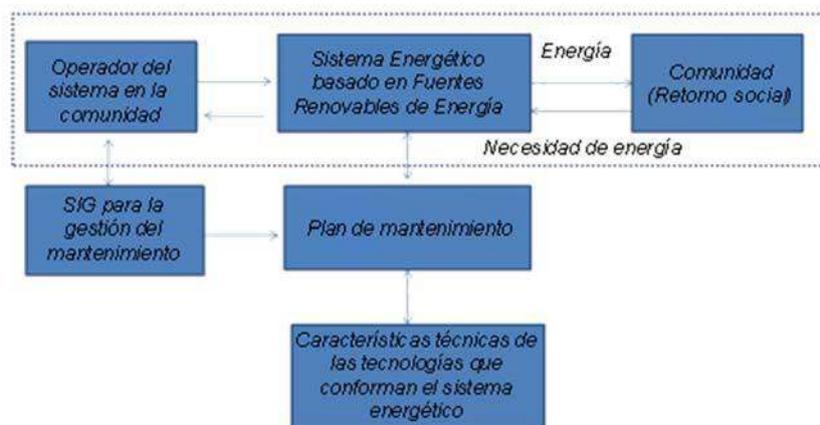
*Fig. 4. Sistema híbrido eólico-fotovoltaico-diésel, una de las tecnologías que puede ser evaluada con el apoyo brindado por los SIG*

Es posible, entonces, a partir de los resultados obtenidos, continuar el desarrollo de esta herramienta en otras localidades geográficas que ameriten evaluar sus posibilidades de electrificación rural. De igual forma, se consideraron los pasos a seguir para desarrollar este SIG, hasta el nivel de seguimiento de operaciones y mantenimiento, lo cual forma parte de la propuesta seguida por los autores, a fin de que sistemas energéticos de

electrificación rural puedan ser monitoreados y asegurar su funcionamiento por el lapso de vida útil planificada.

En esta fase final de los proyectos de electrificación, se determinó la necesidad de establecer un canal de comunicación entre el operador del sistema energético y el encargado del seguimiento y mantenimiento de estos sistemas, ya que la responsabilidad de la continuidad operativa de estos sistema debe seguir recayendo en un ente centralizado (que maneje el stock de repuestos de las tecnologías empleadas, brindado asesoría técnica y encargado de los reemplazos y mantenimientos mayores que requieran los sistemas instalados), no sólo por el monto de inversión de cada sistema, sino también para garantizar su retorno social. Por todo ello se propone el empleo de SIG como herramienta de seguimiento.

Es necesario establecer, además, un mecanismo de comunicación que permitirá el suministro de información oportuna y adecuada de las operaciones de los sistemas energéticos instalados en cada comunidad, lo cual puede hacerse por vía remota, o con el personal encargado de las instalaciones. El esquema propuesto por los autores, para el seguimiento de la operación de los sistemas energéticos instalados en comunidades rurales, se presenta en la figura 5.



*Fig. 5. Esquema de funcionamiento de un SIG para la gestión de operación y mantenimiento de un sistema energético aislado*

Tal como lo muestra la figura 5, existe la posibilidad de engranar mediante SIG un mecanismo de retroalimentación de las operaciones de los sistemas energéticos instalados en las comunidades rurales, para garantizar que estos se encuentren en operación y funcionamiento normal, lo que aumentará la posibilidad de corrección oportuna de fallas, para alcanzar la tasa de retorno social esperada en el tiempo con estos proyectos.

## Conclusiones

Es posible, mediante el empleo de sistemas información geográfica (SIG), realizar un estudio integral de las posibilidades de utilización de distintas fuentes renovables de energía, en el gran conjunto de comunidades rurales no electrificadas en los países en vías de desarrollo, siendo estas evaluaciones necesarias y relevantes, si se desea obtener algún financiamiento, o desarrollar proyectos de esta índole.

El diseño de los SIG aplicados a las fuentes renovables de energías, ha demostrado ser de gran utilidad en la estimación y evaluación de las distintas fases de los proyectos de electrificación rural, permitiendo evaluar simultáneamente distintas tecnologías, incorporando al análisis múltiples criterios, los cuales hacen más precisa la determinación de las mejores opciones, dentro de los escenarios planteados. Además, es factible inclusive incorporar el empleo de las herramientas de los SIG al proceso de seguimiento y monitoreo de las operaciones del sistema energético instalado, para garantizar el retorno social esperado durante la vida útil de esos proyectos.

Los recursos gráficos que presentan los SIG facilitan el análisis de los resultados y la toma de decisión, para los diferentes actores involucrados en los proyectos de electrificación rural y, por ende, es una herramienta estimable para esos proyectos.

## Bibliografía

- AMADOR, J. (2000). «Análisis de los parámetros técnicos en la aplicación de los sistemas de información geográfica a la integración regional de las energías renovables en la producción descentralizada de electricidad». Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, España, 2000. 270 pp.
- Agencia NASA. Disponible (junio 2011) en la página de Internet: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>.
- BELMONTE, S., et al. (2009). «Integración de las energías renovables en procesos de ordenamiento territorial», en *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente ASADES*, vol. 13, 2009. Argentina. ISSN 0329-5184. pp. 41-48.
- Corporación Venezolana de Guayana (2007). *Estimación de los requerimientos de generación del sistema eléctrico nacional a mediano y largo plazo*. Venezuela: Edición División de Planificación de Sistemas Eléctricos, 2007.
- DÍAZ, P. (2003). «Confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos: Aplicación a la electrificación rural». Tesis Doctoral de la Universidad

Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Telecomunicación, 2003.

DOMÍNGUEZ, J. (2002). «La integración económica y territorial de las energías renovables y los sistemas de información geográfica». Tesis Doctoral de la Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Geografía e Historia, 2002.

DOMÍNGUEZ, J., et al. (2009). *Electrificación rural en el municipio de Cobán, departamento de Alta Verapaz (Guatemala), según el Modelo IntiGIS*. España: CIEMAT, 2009.

DOMÍNGUEZ, J., et al. (2011). «Sistemas de información geográfica y electrificación rural, una herramienta imprescindible para la integración de las energías renovables en el ámbito iberoamericano». Disponible (mayo, 2011) en:  
<http://www.clerargentina.org.ar/presAcademicas/PDF/Internacionales/XXII%20Cler%20Colombia%20-%20Quijano-Pascua-Gonzalez.pdf>.

EGIDO, M. Y M. CAMINO. (2008). «Guía de normas y protocolos técnicos para la electrificación rural con energías renovables». Disponible (junio, 2011) en: [www.dosbe.org](http://www.dosbe.org).

FUENTES, M. Y M. ÁLVAREZ. (2004). «Modelos de electrificación rural dispersas, mediante energías renovables en América Latina un planteo alternativo basado en el desarrollo rural», en *Cuaderno Urbano*, no. 4, pp. 203-229, Argentina, 2004.

LINARES, P., et al. (2010). «Evaluación del potencial de las fuentes de energía renovables y las tecnologías para su aprovechamiento: oportunidades y retos para el sector de la electricidad», en *Revista notas d'economía*, p. 90-101. España, 2010.

IDEALBA (Geo IDE). Disponible (junio, 2011) en:  
<http://idegeo.blogspot.com/search/label/IDEALBA>.

MUÑOZ, J. (2004). «Recomendaciones sobre el uso de corriente alterna en la electrificación rural fotovoltaica». Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, España, 2004. 173 pp..

LUCANO, M. e I. MIRANDA. (2008). «Estimación de la radiación solar en Bolivia utilizando modelos SIG e imágenes satelitales», en *Revista Universidad Mayor de San Simón*, Bolivia, 2008.

MODERGIS: Modelo de energía sostenible. Disponible (junio, 2011) en:  
[http://www2.unalmed.edu.co/~modergis/index.php?option=com\\_content&view=article&id=10&Itemid=8](http://www2.unalmed.edu.co/~modergis/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=8). Colombia.

OCHOA, J. (2009). «Criterios de evaluación y análisis de alternativas para el diseño de proyectos de electrificación rural con energía eólica y solar en países en desarrollo». Tesis de Maestría de la Universidad Politécnica de Catalunya, España 2009.

RODRÍGUEZ, M., et al. (2005). «Uso del Sistema de Información Geográfica (SIG) como herramienta en la toma de decisiones en el programa de electrificación rural», en *Eco Solar*. Disponible (junio, 2011) en: <http://www.cubasolar.cu/.../Ecosolar/Ecosolar14>. ISSN 1028-6004.

## **Fortalecimiento del sistema de protección contra incendios forestales en el macizo montañoso Guamuhaya**

### **Strengthening of the protection system against forest fires in Guamuhaya mountain range**

*M.Sc. P. R. Zamora González\*, Lic. O. Pérez Rodríguez\*,  
Ing. Héctor Martínez Jiménez\*, M.Sc. Ismabel M. Domínguez Hurtado\*,  
M. Sc. Yoexni Pérez Veitía\* Ing. Armando Solano Cabrera\*\**

*\* Cuerpo de Guardabosques, Delegación  
Provincial del Ministerio del Interior,  
Santa Clara, Villa Clara, Cuba.*

*\*\* Estación Experimental Forestal Placetas, Villa Clara, Cuba.  
e-mail: solano@forestales.co.cu*

#### **Introducción**

Los incendios forestales son uno de los principales agentes destructores de los bosques y el medio ambiente, provocando pérdida de la biodiversidad, acelerando la deforestación, la erosión y la contaminación, entre otros daños. Esos efectos negativos se hacen más irreversibles cuando se presentan en ecosistemas tan frágiles como los montañosos.

Según datos de la FAO, al año se queman más de doce millones de hectáreas de bosques, lo que representa 0,3% de la superficie boscosa mundial. En Cuba es de 0,2%. Es por ellos que este asunto continúa siendo motivo de preocupación para muchos organismos e instituciones, y es tenido en cuenta en diversos eventos nacionales e internacionales.

El comportamiento histórico de los incendios forestales en la región central de Cuba, indica que, en los últimos años, en el Macizo Montañoso Guamuhaya se ha experimentado una mayor incidencia y afectaciones por causa de estos siniestros, además de haberse producido cierta cantidad de quemados sin permiso, e incendios en áreas no clasificadas como bosques.

Este Macizo, clasificado como una de las Regiones Especiales de Desarrollo Sostenible del país, presenta un ecosistema muy frágil con importantes valores naturales y potencialidades económicas, por lo que constituye una de las principales prioridades del Cuerpo de Guardabosques (CGB) durante las Campañas de Protección Contra los Incendios Forestales (PCIF).

Desde el 2003, el Cuerpo de Guardabosques cuenta con una guía metodológica para la organización y preparación de esas campañas, la que continúa siendo de gran utilidad; sin embargo, se ha podido demostrar que

para enfrentar los incendios forestales en el Macizo Guamuhaya se hace necesario desarrollar un grupo de acciones más específicas que permitan elevar la eficiencia del Sistema de Protección Contra Incendios Forestales.

De aquí que este trabajo tenga como objetivo principal perfeccionar el Sistema de Protección Contra Incendios Forestales en el Macizo Montañoso Guamuhaya, a partir de la aplicación de un grupo de acciones precisas de carácter organizativo-preparatorias.

## **Materiales y métodos**

### **Ubicación de la investigación**

El grupo orográfico Guamuhaya está situado al sur de la porción central de Cuba. Limita al Norte con las alturas de Santa Clara, al Este con el valle del río Zaza, al Oeste con el valle del río Arimao y al Sur con el Mar Caribe. Tiene una superficie de 1 586 km<sup>2</sup> (11% del área montañosa de Cuba, aproximadamente), ocupando parte de las provincias de Sancti-Spíritus, Villa Clara y Cienfuegos.

Presenta temperaturas, en sus los valores medios anuales, entre 20 y 26 °C, y más; la humedad relativa media es alta, con promedios superiores a 85%, con máximos diarios generalmente superiores a 92%, que ocurren a la salida del sol, mientras que los mínimos descienden, al mediodía, hasta 60-70%. En la zona predominan los vientos del Este, con velocidades entre 6 y 10 km/h; no obstante, debe señalarse la fuerte dependencia que existe entre la dirección de los vientos y la orografía del lugar, siendo muy notable localmente. El elemento que más varía en el clima de la montaña son las precipitaciones, donde la media anual sobrepasa los 1 000 mm [Saura y Osés, 2003].

Posee un relieve muy accidentado con alturas entre 700 y 900 msnm; la complejidad del relieve y los altos valores de las características morfométricas de esta región, restringen la vocación del territorio fundamentalmente al uso forestal y a la economía cafetalera, y en menor escala a la actividad ganadera, y también a prácticas responsables del turismo de naturaleza.

### **Aspectos para el análisis de la problemática**

Para el desarrollo de este trabajo se tuvieron en cuenta tres aspectos principales: Primeramente, los valores desde el punto de vista económico, ecológico, social, cultural y paisajístico que posee el Macizo, los cuales se están afectando por los incendios forestales, así como por el mal manejo del fuego.

En segundo lugar, el comportamiento histórico de los incendios forestales en el Macizo durante los último cuatro años.

Y se realizó un análisis de los aspectos positivos y(o) negativos que han estado incidiendo en el funcionamiento del Sistema de Protección Contra Incendios Forestales del Macizo, de manera que permitiese definir las principales fortalezas y debilidades para mejorar su eficiencia, y a su vez, facilitar la determinación de las acciones que permitan lograr una mayor preparación y organización para llevar adelante las Campañas de Protección Contra Incendios Forestales.

### **Obtención de los datos**

Para la realización del estudio del comportamiento de los incendios forestales se tomaron datos procedentes de las estadísticas del Cuerpo de Guardabosques de la Región Central, contentivas de la cantidad de incendios, las afectaciones (cantidad de hectáreas) y las causas que los provocaron, así como la fecha en que ocurrieron, para identificar el período de alto riesgo y los meses de máximo peligro.

Esta información es tomada a partir del 2002 hasta el 2005, ya que en esa etapa es cuando comienza a reportarse la situación más crítica con los incendios forestales en el Macizo Guamuhaya.

### **Análisis y discusión de los resultados**

Como resultado del análisis realizado al comportamiento histórico de los incendios forestales en esta Región Especial de Desarrollo Sostenible, se determinó que en el período del 2002 al 2005 se reportaron 72 incendios forestales que representan 20% del total de la región, que afectaron 2 300,9 hectáreas de bosques, las cuales ocupan 24% del total de las afectaciones de la región, considerándose altos estos porcentajes, teniendo en cuenta que el Macizo sólo ocupa 8% de la extensión de la región.

En resumen, como promedio por año han ocurrido 18 incendios, con 575,2 hectáreas afectadas. Debe señalarse que no se tuvo en cuenta cierta cantidad de incendios que fueron combatidos y extinguidos en las áreas colindantes al bosque. Se aprecia que en los últimos cuatro años ha persistido la tendencia al aumento, tanto en el número de incendios como en las afectaciones (Anexos 1 y 2).

El análisis de las causas que provocaron estos incendios forestales durante el período 2002-2005, arrojó que estuvieron dados 58% por negligencias, 11% intencionales y 31% sin determinar (Anexo 3).

Teniendo en cuenta lo anterior, y que en el Macizo nunca se han reportado incendios por causas naturales, podemos afirmar que el principal causante de los incendios forestales en esta región es el hombre, ya sea por mal manejo o por el uso descontrolado del fuego sin autorización.

Otro resultado del estudio de los incendios forestales ha permitido identificar como período de alta peligrosidad en el Macizo, el comprendido entre febrero-mayo, enmarcándose 97,3% de los incendios forestales en dicho período. Por otra parte, ha quedado establecido que los meses de máximo peligro son marzo y abril, los que registran en esta etapa 80% del total de esos siniestros.

El análisis realizado a los aspectos positivos y(o) negativos que han estado incidiendo en el funcionamiento del Sistema de Protección Contra Incendios Forestales del Macizo, identificados por el CGB en los informes de las campañas de protección contra incendios forestales en 2003-2004 y 2004-2005, permitió definir como principales fortalezas y debilidades las siguientes:

#### *Fortalezas*

- Sistema estatal integrado y con experiencia en el enfrentamiento de otros tipos de catástrofes para los cuales puede ser utilizado.
- Alto nivel de prioridad otorgado por la máxima dirección del país a estas regiones montañosas.
- Existencia de una Junta Coordinadora de Atención al Plan Turquino, como elemento aglutinador de todos los factores que forman parte del Sistema de Protección Contra Incendios Forestales en el Macizo.
- Comprensión por los organismos de la Administración del Estado acerca de la necesidad de priorizar y atender adecuadamente esta tarea.
- Existencia de unidades organizativas del Cuerpo de Guardabosques que se encargan de la vigilancia y protección de los recursos naturales.
- Voluntad predominante en la población sobre la necesidad de combatir los incendios.
- Política y estrategia encaminada hacia una educación ambiental, con el uso de todos los medios disponibles, para transmitir información dirigida a crear una cultura de protección del medio ambiente.
- Apoyo de los tenentes, con brigadas especializadas y voluntarias, para el control de esos incendios.

- Existencia de una Legislación que regula toda la actividad de «protección contra incendios forestales, o manejo del fuego», como actualmente se le denomina.
- Posibilidad del empleo de helicópteros para el combate de los incendios forestales, en coordinación con el MINFAR.
- Existencia de la Directiva No. 01/2005 del Vicepresidente del Consejo de Defensa Nacional para la Planificación, Organización y Preparación del país para situaciones de desastres.

### *Debilidades*

- Limitaciones con los recursos materiales y financieros destinados a la protección, tanto para el CGB, como para los tenentes de áreas boscosas y colindantes.
- Condiciones climáticas adversas que favorecen el surgimiento de los incendios forestales y un mayor uso del fuego por los habitantes del bosque.
- Alta acumulación de material combustible en las áreas boscosas.
- Elevada actividad humana en las áreas boscosas y sus colindancias.
- Ineficiente vigilancia y protección por parte de los tenentes y/o administradores de las áreas boscosas.
- Débil exigencia y control del Cuerpo de Guardabosques sobre el cumplimiento de las medidas preventivas contra incendios forestales.
- Escasa red de detección de incendios, fundamentalmente puestos y puntos de observación.
- Problemas en el funcionamiento de los sistemas de aviso.
- Escasas comunicaciones, fundamentalmente mediante medios portátiles.
- Poca experiencia y preparación en la prevención y combate de los incendios forestales.
- Bajos conocimientos y, en determinados lugares, rechazo de las nuevas regulaciones y procedimientos administrativos para hacer un adecuado uso del fuego en las áreas de bosques y sus colindancias.

A partir del análisis de los resultados expuestos anteriormente, se propone un grupo de acciones para fortalecer el Sistema de Protección Contra Incendios Forestales en el Macizo Montañoso Guamuhaya, las que se dividen en dos períodos: el primero preparatorio, desde el 1ro. de octubre hasta el 31 de enero, que consiste en la realización de un conjunto de medidas de preparación y coordinación para garantizar la entrada

organizada al período crítico; y el segundo, crítico en cuanto a la ocurrencia de incendios forestales, desde el 1ro. de febrero hasta el 31 de mayo.

### **Período preparatorio (octubre-enero)**

- Elaborar los programas de educación y divulgación, coordinando las acciones con el MINED, el CITMA, los Consejos Populares y el Oficial de Prensa del MININT.
- Precisar con la Defensa Civil en cada municipio las acciones de cooperación para la prevención y combate de los incendios forestales.
- Comprobar la elaboración y ejecución de los Planes de Protección Contra Incendios Forestales de los tenentes y(o) administradores de las áreas boscosas, así como el Plan de Acciones de los colindantes a dichas áreas.
- Precisar con los tenentes y(o) administradores de las áreas boscosas, la organización y capacitación de las brigadas especializadas y voluntarias.
- De conjunto con el MINFAR, el Cuerpo de Bomberos y la Defensa Civil, realizar el estudio e identificación de las presas que puedan ser empleadas por los helicópteros para el combate de los incendios forestales.
- Coordinar, elaborar y firmar las actas de cooperación para la utilización de las pistas auxiliares a emplear por la aviación.
- Establecer con el Jefe del Órgano de Comunicaciones, Informática y Cifras, las coordinaciones necesarias para garantizar las comunicaciones.
- Realizar entrenamientos en determinación de causas que provocan los incendios forestales, y establecer coordinaciones con los órganos competentes para el esclarecimiento y detección de los infractores.
- Realizar actos o reuniones de inicio de campaña a nivel municipal y local, dándose a conocer las decisiones del Jefe de Circuito del Cuerpo de Guardabosques para enfrentar el período crítico de ocurrencia de incendios forestales, así como las medidas tomadas por los tenentes y(o) administradores de las áreas boscosas, el Gobierno y la Defensa Civil.
- En coordinación con la Junta Coordinadora de atención al Plan Turquino, realizar talleres para la evaluación de la etapa preparatoria de la Campaña de Protección Contra Incendios Forestales.
- Desarrollar ejercicios preparatorios en coordinación con los Puntos de Dirección de la Defensa Civil en los municipios, comprobando el

funcionamiento del Modelo General para la Organización de los Puestos de Mandos en caso de incendios forestales (Anexo 4).

### **Período crítico (febrero-mayo)**

- Reforzar el sistema de detección de incendios forestales, activando los puestos y puntos de observación, y ampliar gradualmente estos por parte de otros órganos y organismos.
- Activar el sistema de aviso, localización y transportación de las fuerzas y medios de las brigadas especializadas y voluntarias.
- Limitar el permiso para hacer uso del fuego en las áreas de bosques y sus colindancias, cuando las condiciones del clima así lo requieran.
- Perfeccionar la toma de decisión de los Jefes de Circuitos de Protección para enfrentar el período de alta peligrosidad de ocurrencia de incendios forestales.
- Precisar en el terreno los acuerdos de cooperación con respecto al uso de las pistas auxiliares.
- Puntualizar el marcaje de las presas para ser utilizadas por helicópteros.
- Prohibir o limitar la circulación y estacionamiento de personas y vehículos en las áreas de bosques y sus colindancias, cuando la situación lo requiera.
- Continuar comprobando la ejecución de las medidas preventivas plasmadas en el Plan de PCIF de los tenentes y(o) administradores de áreas boscosas y sus colindantes.
- Continuar evaluando periódicamente en las reuniones de la Junta Coordinadora del Plan Turquino el comportamiento de los incendios forestales en el Macizo.
- Desarrollar, de conjunto con el Gobierno, análisis sistemáticos sobre el comportamiento de la campaña.

Luego de la correcta implementación de las acciones relacionadas anteriormente, se lograron obtener algunos resultados concretos en la campaña de PCIF 2005-2006, tales como:

- La consolidación del Sistema de PCIF en cuanto a la prevención y combate de los incendios.
- Preparación y capacitación de todos los directivos que forman parte del Sistema de PCIF y otros factores a nivel de base.
- Se logró un mejor control y fiscalización de los planes de PCIF de los tenentes, de conjunto con el Servicio Estatal Forestal.

- Se alcanzaron mayores niveles de cumplimiento de las medidas preventivas de PCIF a partir del incremento de la labor educativa-divulgativa, y la aplicación de la Legislación vigente por parte del CGB.
- Se elevaron los conocimientos de la población en general en cuanto al correcto uso y manejo del fuego en las áreas de bosques y sus colindancias.
- Como resultado final, y más importante, se redujo la ocurrencia de incendios forestales y sus afectaciones con respecto al 2005 (Anexo 5).

## **Conclusiones**

1. La tendencia al incremento, tanto del número de incendios como de las afectaciones que se han venido reportando en los últimos años en el Macizo Montañoso Guamuha, hacen necesaria la implementación de este Plan de acciones.
2. La prevención, control y extinción de los incendios forestales no es sólo un problema del Cuerpo de Guardabosques, sino de un Sistema del cual forman parte los tenentes y(o) administradores de áreas boscosas, el MININT, el SEF, la Defensa Civil, el CITMA y los órganos gubernamentales a los diferentes niveles, entre otros.
3. Las acciones definidas han contribuido a lograr una mayor organización y preparación de las campañas, así como a elevar el nivel de eficacia del Sistema de Protección Contra Incendios Forestales en el Macizo.
4. A partir de la aplicación de este Plan de acciones, se logró reducir en el 2006 el número de incendios forestales (en -31), con respecto al 2005, al igual que las afectaciones (en -732,4 ha).

## **Recomendaciones**

Generalizar este trabajo en todos los macizos montañosos del país, con el objetivo de lograr una homogenización del trabajo del Sistema de Protección Contra Incendios Forestales.

## **Bibliografía**

- BATISTA, ANTONIO CARLOS, et al. (2001). *Manual sobre prevención de incendios forestales*. La Habana: marzo, 2001. 66 p.
- CABRERA, J. Y M. P. RAMOS (1996). «Prevención y mitigación de incendios forestales», en *Resúmenes de la Conferencia Internacional sobre Desastres Naturales*. La Habana, Cuba, 1996.

CIANCIULLI, P. L. (1981). *Incendios Florestais. Prevencao e Combate*. Livraria Nobel S. A. Sao Paulo. Brasil. 1981. 169 pp.

CITMA (1997). *Estrategia Ambiental Nacional*. La Habana: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 1997. 27 p.

CGB (2003). *Guía metodológica para los Jefes de Regiones del CGB en interés de la Organización y Desarrollo de la Campaña de Protección Contra Incendios Forestales 2003-2004*. La Habana: Jefatura Cuerpo del Guardabosques, 2003. 5 p.

CGB (2004). *Informe resumen sobre los resultados de la Campaña de Protección Contra Incendios Forestales 2003-2004 en la Región Central*. Villa Clara, julio, 2004. 5 p.

CGB (2005). *Informe resumen sobre los resultados de la Campaña de Protección Contra Incendios Forestales 2004-2005 en la Región Central*. Villa Clara, julio, 2005. 5 p.

CGB (2006). *Informe resumen sobre los resultados de la Campaña de Protección Contra Incendios Forestales 2005-2006 en la Región Central*. Villa Clara, julio, 2006. 10 p.

CNAP (2004). *Áreas Protegidas de Cuba*. La Habana: CNAP, CITMA, 204. 112 p.

CDN (2005). *Directiva 01 del Vicepresidente del Consejo de Defensa Nacional para la Planificación, Organización y Preparación del País para Situaciones de Desastres*. La Habana: 2005. 83 p.

Instituto de Geografía Tropical (2001). *Libro de las montañas de Cuba*. La Habana: IGT, CITMA, 2001.

Jefatura Nacional del Cuerpo de Guardabosques (1999). *Ayuda metodológica, elementos generales a tener en cuenta para la toma de la decisión sobre la protección contra los incendios forestales en el período de alta peligrosidad de ocurrencia*. La Habana: 1999. 4 p.

Jefatura CGB. Región Central (2005a). *Estadísticas de incendios forestales*. Villa Clara, 2005.

Jefatura CGB. Región Central (2005b). *Toma de la Decisión sobre la Protección Contra Incendios Forestales en el período de alta peligrosidad de ocurrencia*. Villa Clara, 2005, 13 p.

MÉRIDA, J. C. (2000). *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. España: McGraw-Hill, 2000.

NÁJERA, A. (2001). *Técnicas de rehabilitación de áreas afectadas por los incendios forestales. Diseño para una estrategia para el combate de incendios forestales*. Proyecto TCP/CUB/00066-FAO-Cuba. Enero, 2001. 81 p.

Órgano de Montaña (2004). *Caracterización del Macizo Guamuhaya*. Sancti-Spiritus: Órgano de Montaña, CITMA, 2004. 50 p.

RAMOS, M. P. (1999). «Bases metodológicas para el perfeccionamiento de la prevención de los incendios forestales». Tesis en opción al grado

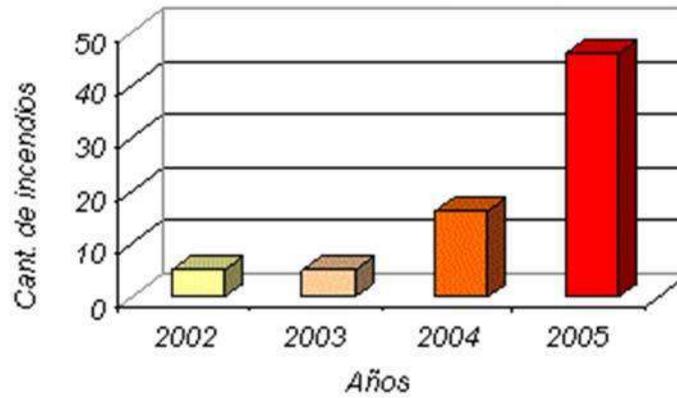
científico de Doctor en Ciencias Forestales. Universidad de Pinar del Río, 1999.

SAURA, G. Y R. OSÉS (2003). *Caracterización climática de la zona montañosa de Villa Clara, con vistas a su aplicación en estudios de riesgo*. Villa Clara: Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, CITMA, 2003. 8 p.

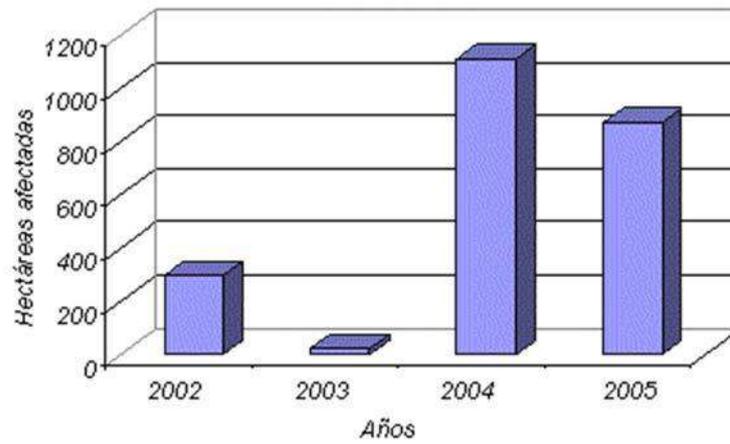
SOARES, R. V. (1985). *Incendios Florestais. Controle e uso do fogo*. Fundacao de Pesquisas Florestais do Paraná. Curitiba: 1985. 213 pp.

SEF (1998). *Ley Forestal, su reglamento y contravenciones*. La Habana: Servicio Estatal Forestal, 1998. 93 p.

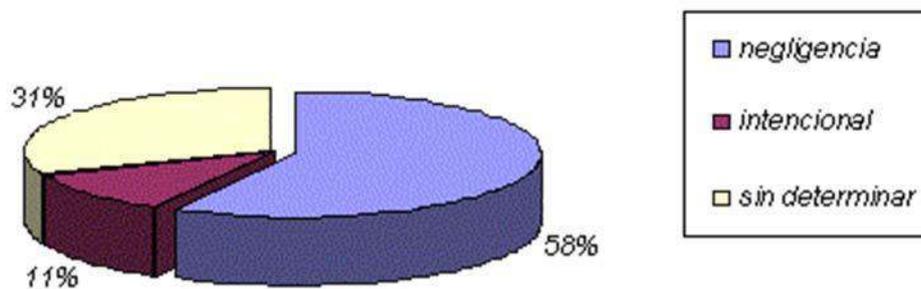
Anexo 1. Ocurrencia histórica de incendios forestales.  
Período 2002-2005



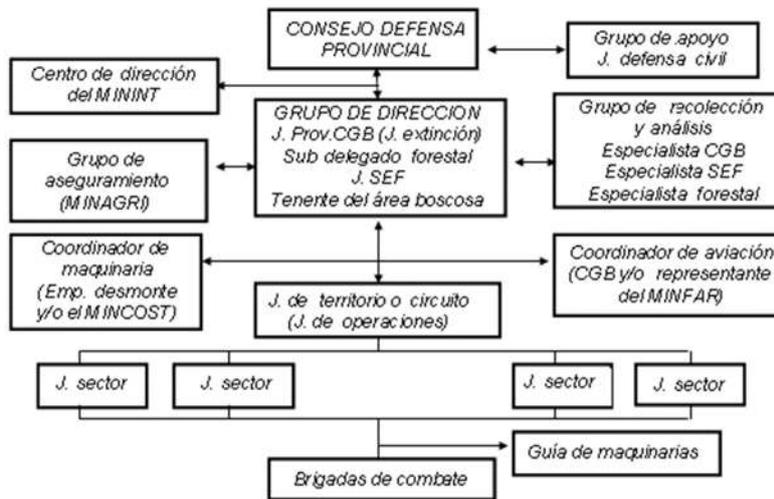
Anexo 2. Afectaciones, en hectáreas, ocasionadas por los incendios forestales



Anexo 3. Causas que provocaron los incendios forestales



Anexo 4. Modelo general para la organización del puesto de mando en caso de incendios forestales



Anexo 5. Comportamiento de los incendios forestales y sus afectaciones por Circuitos de Protección. Período 2005-2006

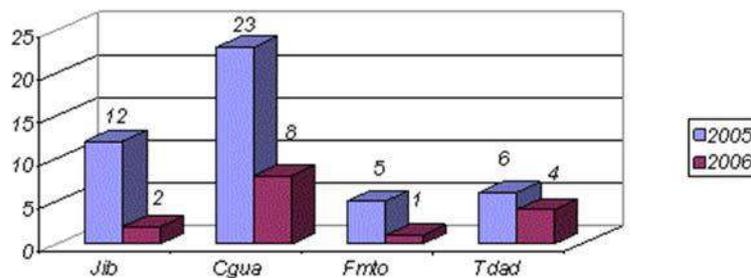


Gráfico 1. Comportamiento de los incendios. Años 2005-2006

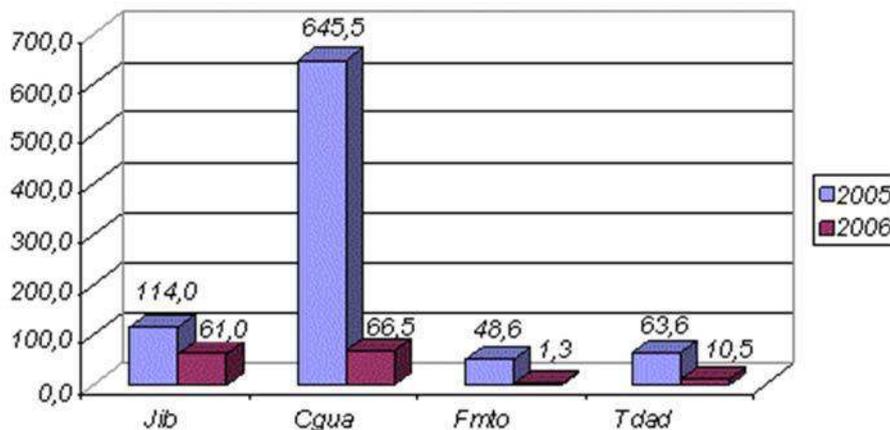


Gráfico 2. Comportamiento de las afectaciones (ha). Años 2005-2006

**Eco Solar** es una publicación científica electrónica trimestral para los especialistas de las fuentes renovables de energía. Se dedica a la promoción de temas relacionados con la energética, las energías alternativas, la física ambiental, la arquitectura bioclimática, el impacto sobre el medio ambiente la educación ambiental, la termoconversión, la eficiencia energética, y las energías de origen hidráulico, fotovoltaico, eólico, solar, biomasa y ciencias relacionadas

**DIRECTOR GENERAL:**

Dr. Luis Bérriz Pérez.

**DIRECTOR:**

M.Sc. Manuel Álvarez González.

**EDITOR JEFE:**

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

**EDITORA:**

M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez.

**CORRECCIÓN:**

Ing. Jorge Santamarina Guerra

**CONSEJO EDITORIAL:**

Dr. Luis Bérriz Pérez.

M.Sc. Manuel Álvarez González.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

Dra. Tania Carbonell Morales.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

M.Sc. Daniel López Aldama

**DISEÑO ELECTRÓNICO:**

D.I. Antonio Romillo Polaino.

**WEB MASTER:**

M.Sc. Fernando González Prieto.

**CONSEJO ASESOR:**

Dra. Elena Vigil Santos.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

Dr. Sergio Corp Linares.

Dr. José Guardado Chacón.

Dr. Deny Oliva Merecio.

Dra. Dania González Couret.

Dr. Juan José Paretas.

Lic. Bruno Henríquez Pérez.

M.Sc. Leonor Turtós Carbonell.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

Lic. Ricardo Bérriz Valle.

Dr. César Cisnero Ramírez



**SOCIEDAD CUBANA PARA LA PROMOCIÓN  
DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EL RESPETO  
AMBIENTAL**

Calle 20 no. 4113, esquina a 47, Miramar, Playa,  
Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal: 11300.

Teléfono: (537) 205-9949.

Apartado postal: 6611, CP: 10600, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: [editora@cubasolar.cu](mailto:editora@cubasolar.cu)

<http://www.cubasolar.cu>