


# enerLAC

Revista de  
Energía de  
Latinoamérica  
y el Caribe





Fotografía de la portada ©ICE, Dirección Comunicación  
e Identidad Corporativa, Parque Eólico Tejona  
Fotografías solicitadas por - OLADE.  
Autor artístico, fotógrafo: Jimmy Arriola Barrantes.

© Copyright Organización Latinoamericana de Energía  
(OLADE) 2017. Todos los derechos reservados.

[www.olade.org](http://www.olade.org)  
[enerlac@olade.org](mailto:enerlac@olade.org)  
(+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995 / 2599-489  
Quito, Ecuador

## COMITÉ EDITORIAL

*Alfonso Blanco*

SECRETARIO EJECUTIVO

*Andrés Schuschny*

DIRECTOR DE ESTUDIOS, PROYECTOS E INFORMACIÓN

*Pablo Garcés*

ASESOR TÉCNICO

*Martha Vides L.*

ESPECIALISTA PRINCIPAL DE HIDROCARBUROS

*Alexandra Arias*

ESPECIALISTA PRINCIPAL DE ELECTRICIDAD

*Blanca Guanocunga*

BIBLIOTECARIA

## COORDINADOR@S DE LA EDICIÓN

*Alfonso Blanco*

DIRECTOR

*Pablo Garcés*

EDITOR

*Andrés Schuschny, Martha Vides L.*

REVISORES

*Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad de los autores y no comprometen a las organizaciones mencionadas.*

## DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

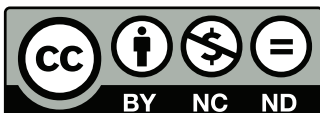
*Ana María Arroyo*

CONSULTORA DE DISEÑO GRÁFICO

## COLABORADORES:

Un agradecimiento al Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ecuador por el apoyo brindado en esta edición; y a *Jaime Martí*, Investigador CIMNE (*International Center for Numerical Methods in Engineering*); *Ricardo Narváez*, Subdirector Técnico del INER (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ecuador); *Alberto Reyes*, Investigador INEEL (Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, México); *Javier Martínez*, Profesor en la UISEK (Universidad Internacional SEK, Ecuador).

*Marysol Materán*, Consultora de Investigación



# DISTRIBUCIÓN FACTIBLE DE AEROGENERADORES EN UN PARQUE EÓLICO

Tania Guerrero<sup>1</sup>, Jessica Constante<sup>2</sup>

Recibido: 12/nov/2016 y Aceptado: 25/nov/2016  
ENERLAC. Volumen I. Número 2. Diciembre, 2017 (24-35).



1 Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ingeniera en Mecatrónica, Analista Técnico de Servicios Especializados 1.

[tania.guerrero@iner.gob.ec](mailto:tania.guerrero@iner.gob.ec)

2 Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ingeniera en Mecatrónica, Analista Técnico de Servicios Especializados 1.

[jessica.constante@iner.gob.ec](mailto:jessica.constante@iner.gob.ec)

Fotografía cedida por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Ecuador.





## RESUMEN

El artículo propone una metodología para la distribución de turbinas en un emplazamiento priorizado en la Provincia de Pichincha en Ecuador; basado en mapas obtenidos de un análisis multicriterio. El emplazamiento se caracteriza por espacios llanos, de baja densidad de aire y alto recurso eólico. El polígono priorizado del sitio se lo realizó analizando el mapa de vientos y multicriterio, los mismos que son mapas tipo ráster y tienen una resolución de 200x200 metros, este es el punto de partida para la ubicación de aerogeneradores. Previo al procesamiento y tratamiento de datos, se analizó las metodologías utilizadas en estudios anteriores para optimizar la ubicación de las turbinas en diferentes tipos de emplazamiento. La metodología propuesta para la distribución de turbinas eólicas en el emplazamiento, considera la dirección predominante del viento para la creación de un tensor que contiene la posición de los aerogeneradores en un polígono, con el fin de simular el efecto estela. Se obtuvieron varias distribuciones para la instalación de aerogeneradores, cada una de ellas con su respectivo número de turbinas y capacidad instalable. Por último, se determinó que la capacidad máxima instalable en el polígono priorizado utilizando la metodología propuesta es de 98MW con 49 aerogeneradores de 2MW.

**Palabras Claves:** Distribución de turbinas, Recurso Eólico, Energía, Parques Eólicos

## ABSTRACT

*A methodology for the distribution of wind turbines in a prioritized location in the Province of Pichincha in Ecuador based on the multicriteria analysis is analyzed in this work. This site is characterized by the high wind resources, low air density and plain terrain. The starting point of the investigation was established based on the calculation of the priority site polygon, which guarantees that the criteria and restrictions of the sites have already been considered analyzing the wind and multicriteria raster maps with a pixel resolution of 200x200 meters. The methodology for the wind turbines distribution, considers the predominant direction of the wind to create a tensor with the position of every turbine to simulate the wake effect. As a result, several distributions were obtained for the installation of wind turbines, each of them with their respective number of turbines and installable capacity. In addition, it was determined that the maximum installed capacity in the prioritized polygon is 98 MW with 49 wind turbines of 2MW.*

**Keywords:** *Micrositing, Wind Resources, Wind Energy, Wind Farms.*

La ubicación computacional de aerogeneradores en un emplazamiento permite calcular y proyectar la energía que entregará el parque de manera anual.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador, existen 3 parques eólicos operativos ubicados en Santa Cruz – Baltra, San Cristóbal y Loja de 2.25 MW, 2.4 MW y 16 MW de potencia instalada respectivamente. En la actualidad, se han desarrollado metodologías para impulsar la energía eólica en el país como es el caso del análisis multicriterio, el cual prioriza sitios con alto potencial eólico con fines de generación eléctrica, tomando en cuenta diferentes criterios de selección como son: el recurso eólico, pendientes de terreno, distancias a vías, a redes y subestaciones eléctricas, estado de las vías, etc. También se ha considerado restricciones como zonas volcánicas, áreas protegidas, zonas de inundaciones, etc. El Estudio fue desarrollado entre el INER y CELEC Termo Pichincha, y profundizado en el artículo de Villacreses et al. (2017)

La ubicación computacional de aerogeneradores en un emplazamiento permite calcular y proyectar la energía que entregará el parque de manera anual. Según Serrano González et al. (2014) el incorrecto dimensionamiento del parque y ubicación de las turbinas afecta al rendimiento de toda la central eólica, produciendo pérdidas importantes de energía. Para encontrar la solución a este problema, se han realizado diferentes tipos de metodologías que permiten posicionar las turbinas tomando en cuenta su ubicación individual, su estela y la dirección predominante del viento en un emplazamiento de estudio. (Samorani, 2013)

En el trabajo expuesto por Mittal et al. (2015), se muestra un modelo híbrido el cual se basa en la combinación de un algoritmo genético probabilístico y la búsqueda de gradientes determinísticos. En el caso de González Martínez (2014), se mencionan varios algoritmos para optimizar las ubicaciones de las turbinas basados fundamentalmente en algoritmos genéticos.

La extracción de energía que se produce en el rotor genera una desaceleración en la velocidad del viento en cada turbina, que afecta el rendimiento de un aerogenerador aguas abajo, formando una zona de velocidad reducida con mayor turbulencia llamada efecto estela (Talayero et al., 2011). La metodología basada en el efecto estela desarrollada por Jensen (1983), es considerada la más precisa y es utilizada en el desarrollo de software según Şişbot et al. (2010).

Cabe mencionar que en el Ecuador no se ha desarrollado una metodología específica para la distribución de turbinas en un parque eólico o micrositing. En este sentido, en este artículo se propone una metodología para la ubicación de turbinas en polígonos priorizados en el país con el fin de aprovechar el recurso disponible para generación eléctrica, que respalde los estudios realizados a la fecha por las instituciones mencionadas. Esta metodología permite posicionar turbinas en un polígono obtenido a partir un análisis multicriterio Villacreses et al. (2017) y de un análisis de mapas en formato raster de potencial eólico-eléctrico y altura. Con esta metodología se determina la capacidad instalable en un parque con diferentes distribuciones, además de ser el paso fundamental para realizar estudios de prefactibilidad y factibilidad de proyectos de generación de electricidad con este tipo de tecnologías.

El documento es organizado de la siguiente manera. En primer lugar se presenta el tratamiento datos de los emplazamientos. Posteriormente se detalla la metodología propuesta y finalmente presentan los resultados obtenidos, las conclusiones y recomendaciones.

## 2. METODOLOGÍA

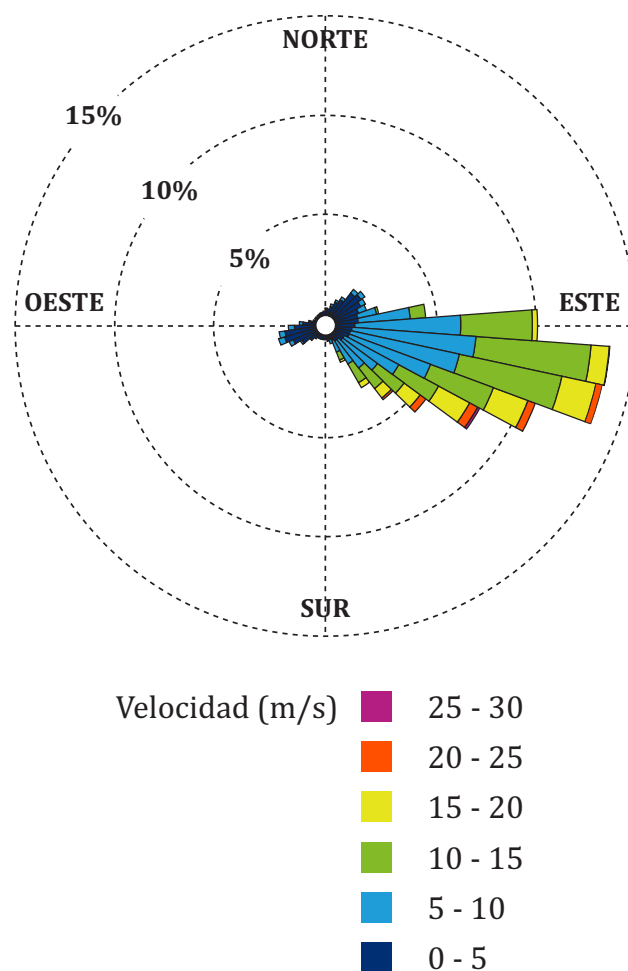
Los datos empleados para el desarrollo del algoritmo fueron obtenidos de una torre de medición instalada en Quito-Loma a 51 m de altura y fueron provistos por La Empresa Eléctrica Quito (EEQ). La torre de medición está compuesta por un data logger Symphonie modelo

Plus 3, iPack GSM, Panel Solar de 5V, sensores como: barómetro, veleta de dirección, sensor de temperatura, voltímetro, sensor de irradiación, sensor de humedad, anemómetro vertical.

Los datos de la torre de medición de Quito-Loma fueron procesados con el fin de obtener las series temporales de cada uno de los sensores, los ajustes de la función de densidad de probabilidad con distribución de Weibull, correlación de datos, rosa de los vientos, intensidad de turbulencia y la densidad de aire.

La rosa de los vientos obtenida de los datos de dirección de viento a 51 m de altura en la torre de medición Quito Loma se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Rosa de los vientos con veleta a 51 m

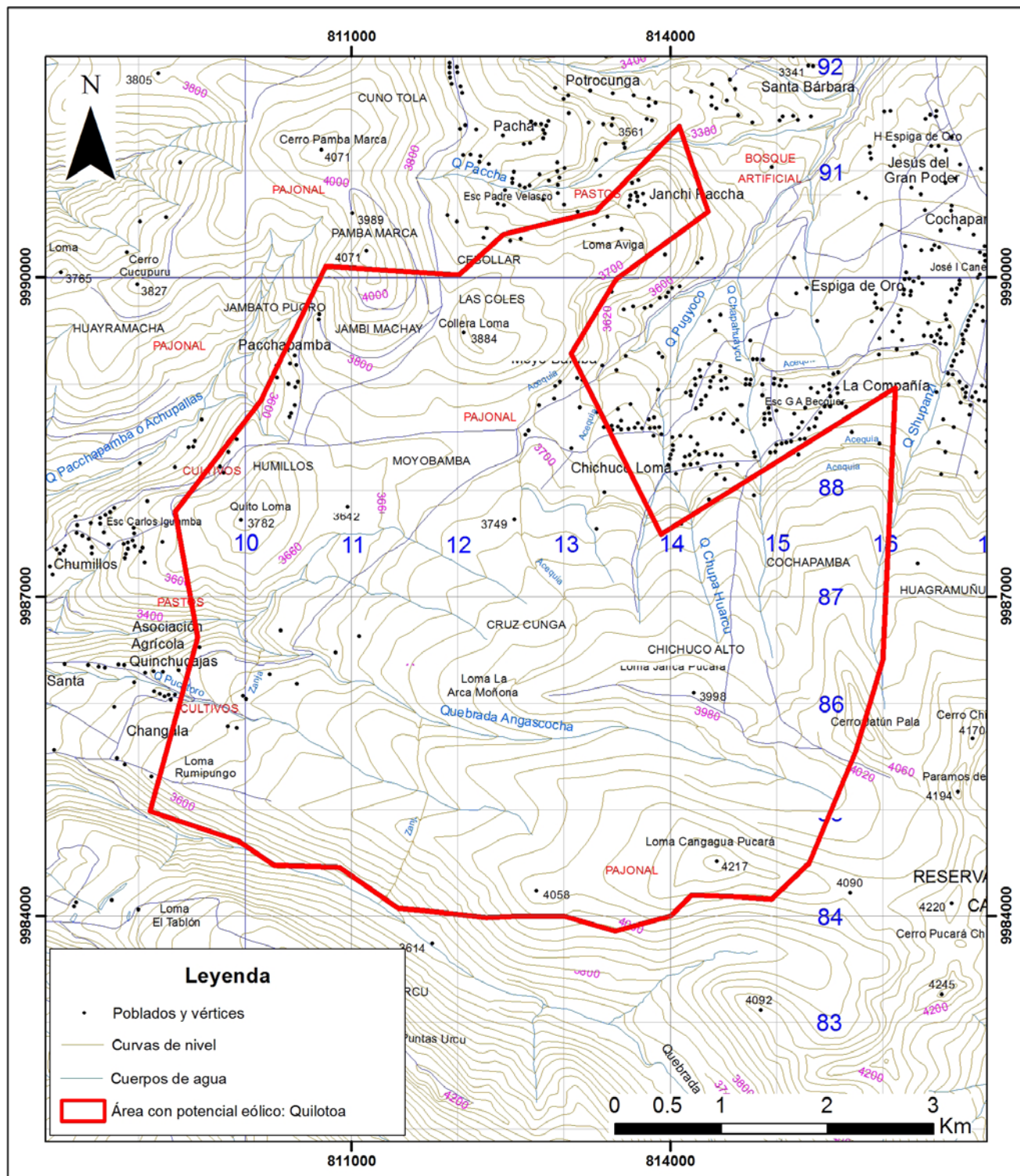


Fuente: Elaboración propia



Por otra parte, la priorización de emplazamiento de Quito-Loma se lo realizó en base al análisis multicriterio de Villacreses et al. (2017), obteniendo un polígono extenso de 811 pixeles, donde cada pixel representan un terreno de 200 x 200 m, para el aprovechamiento de la energía eólica en el sector. En la Figura 2 se puede observar el área priorizada que cuenta con un alto potencial eólico aprovechable.

Figura 2. Polígono priorizado por el análisis multicriterio



Fuente: Instituto Geofísico Militar (IGM) - Elaboración Propia

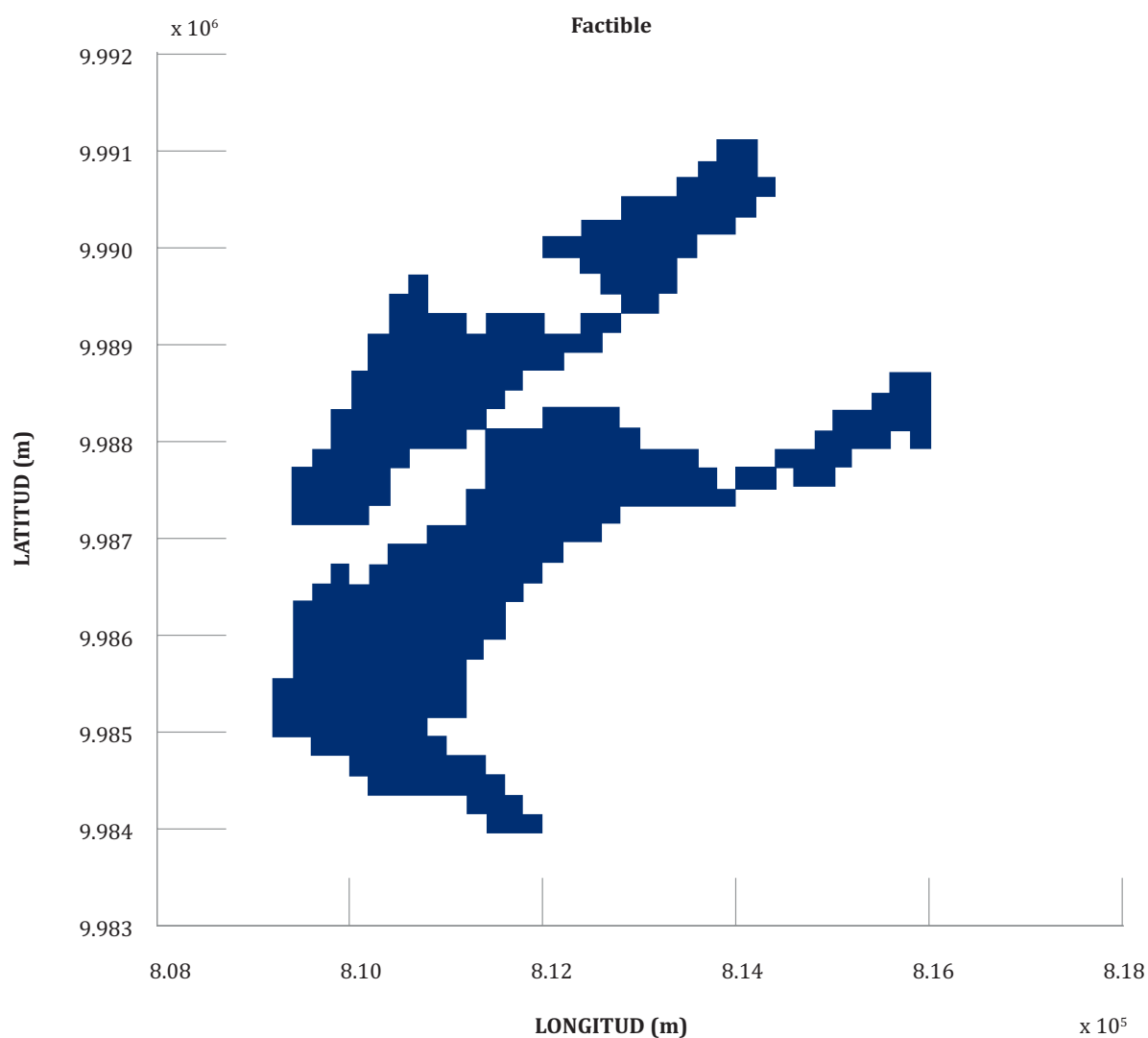


La configuración o distribución de las turbinas en el diseño de un parque eólico es fundamental para aprovechar el recurso eólico disponible en una zona evitando el efecto estela, para ello se desarrolló un algoritmo que permite determinar la ubicación y el número de aerogeneradores que pueden ser instalados en un polígono.

Partiendo del área priorizada se analizan cada uno de los píxeles en los que se podría instalar un

aerogenerador, considerando el mejor potencial eólico y las alturas. Para esto se restringen los píxeles que tienen valores superiores a 600 kW del Potencial Eólico-eléctrico; y se encuentran en el rango de alturas de 3500-3800 metros sobre el nivel del mar, de esta manera se obtiene un polígono final de 346 píxeles como se muestra en la Figura 3, el cual es objeto de estudio para la instalación de aerogeneradores.

Figura 3. Emplazamiento priorizado



Fuente: Elaboración propia

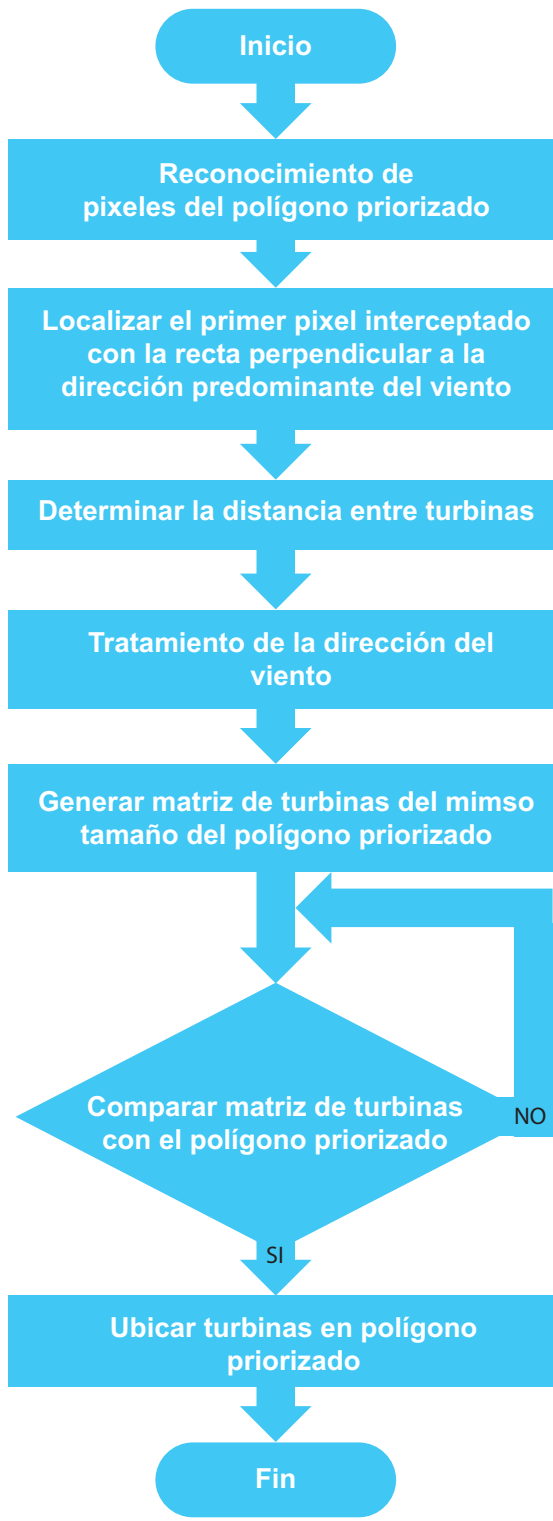
Tomando en cuenta el ángulo de incidencia del viento se localiza el primer pixel interceptado con la recta perpendicular a la dirección predominante del viento, este pixel sirve de referencia para ubicar las turbinas aguas abajo y a sus lados.

La distancia entre turbinas aguas abajo y laterales se calcula utilizando el diámetro del rotor y la dirección predominante del viento que es un vector que se descompone en latitud y longitud; según la bibliografía analizada se debe considerar 3 a 4 veces el diámetro del rotor en la misma fila (perpendicular a la dirección del viento) y una distancia de 5 a 10 veces el diámetro del rotor entre filas (González Martínez, 2014; Sathyajith, 2006).

Una vez determinadas las distancias entre turbinas, se crea una nueva matriz con las mismas dimensiones que el polígono priorizado y en esta se ubican los pixeles que contendrán las turbinas. Por otro lado, se comparan las dos matrices, la matriz del polígono priorizado y la matriz que contiene las turbinas. Finalmente se ubican los aerogeneradores en el polígono priorizado y se contabilizan las turbinas que pueden ser instaladas en ese polígono.

**La configuración o distribución de las turbinas en el diseño de un parque eólico es fundamental para aprovechar el recurso eólico disponible en una zona evitando el efecto estela.**

Figura 4. Diagrama de flujo para el posicionamiento de turbinas



Fuente: Elaboración propia

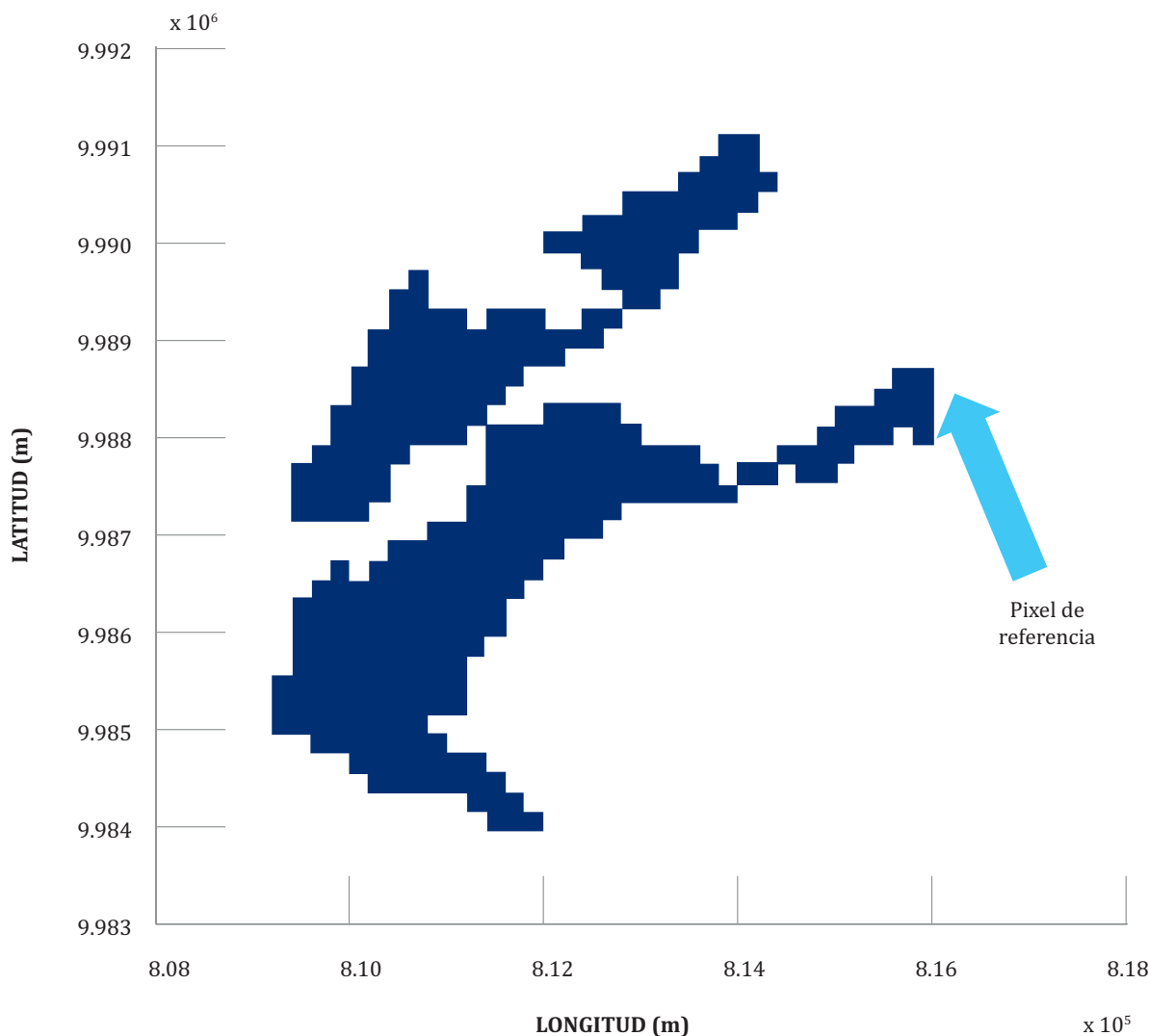
Para determinar la capacidad instalable en el emplazamiento de Quito Loma, se consideró aerogeneradores de 2 MW (MEER, 2013) y tienen un diámetro de barrido de 100 metros.

La capacidad a ser instalada en un parque eólico se estima a partir del número de aerogeneradores que pueden ser instalados en el sitio priorizado y la potencia que entrega cada aerogenerador.

### 3. RESULTADOS

En el emplazamiento Quito-Loma la dirección predominante del viento proviene del este con una ligera inclinación al sur. Por lo tanto el pixel más afectado por esta dirección se muestra en la Figura 5.

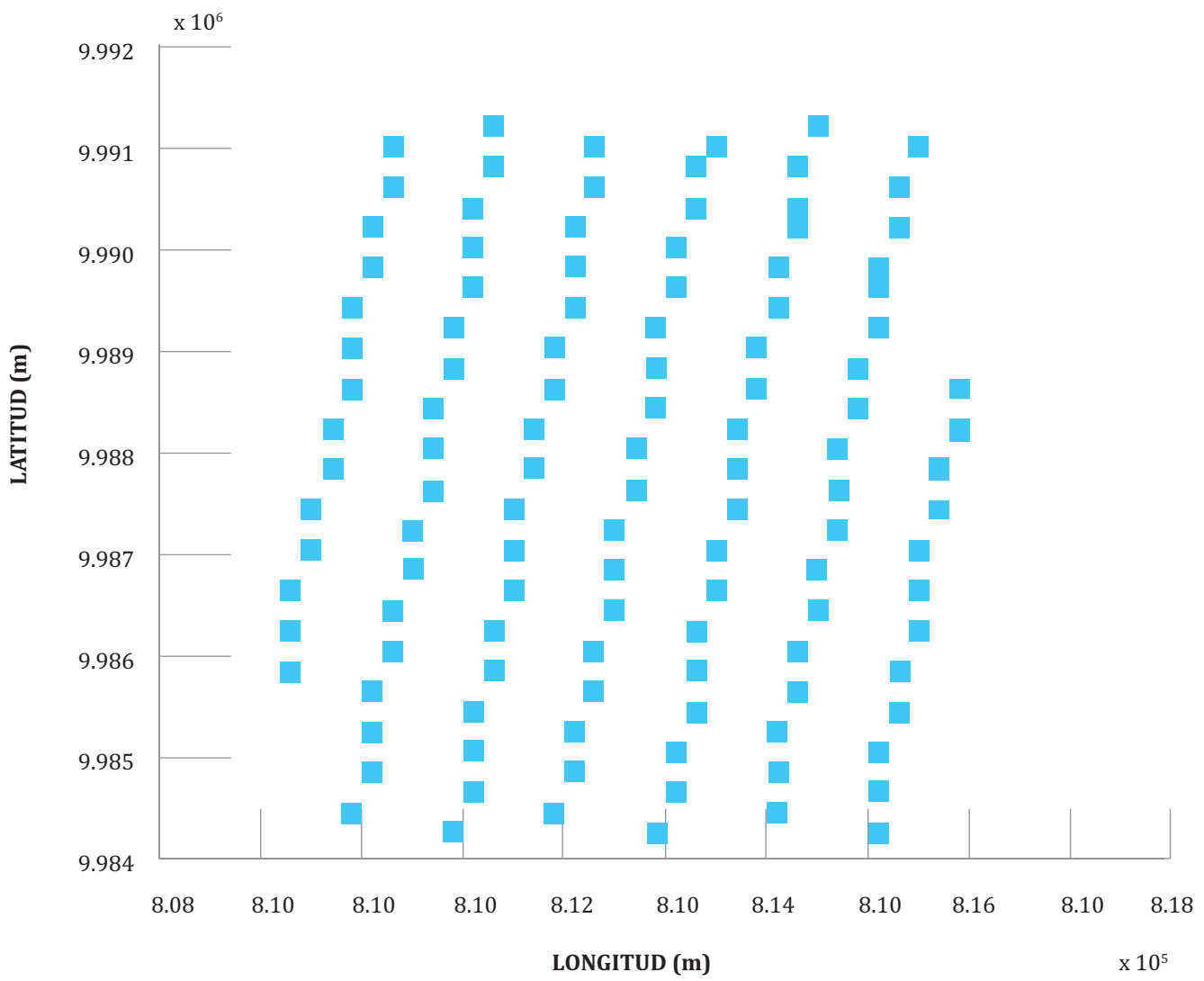
Figura 5. Pixel de referencia seleccionado



Fuente: Elaboración propia

La distribución de las turbinas en la nueva matriz se muestra en la Figura 6. La matriz de turbinas tiene el mismo tamaño que la matriz del polígono de priorizado, partiendo del pixel de referencia se recorrió 10 diámetros del rotor aguas abajo y 4 diámetros a sus lados.

Figura 6. Distribución de turbinas

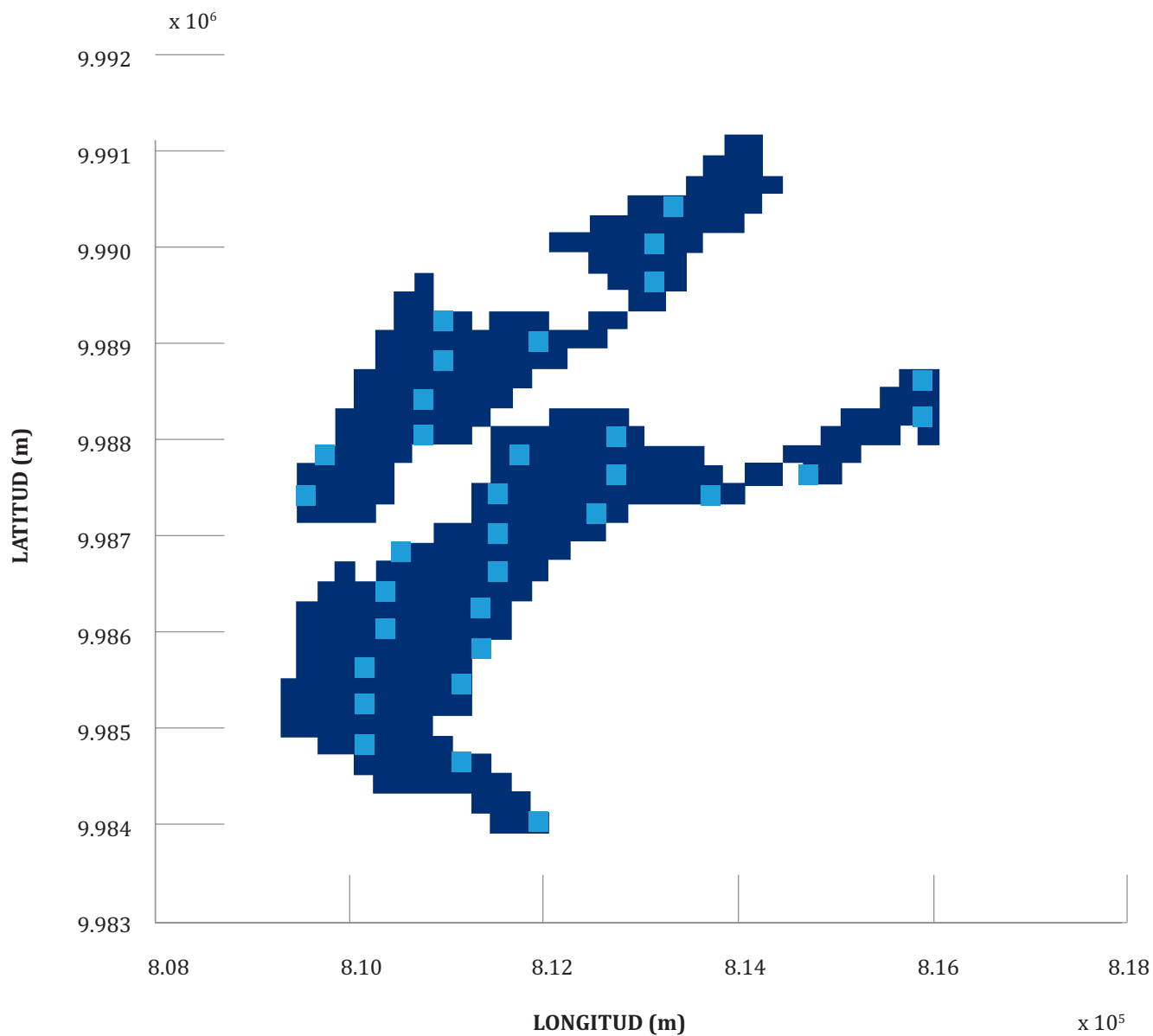


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7 se muestra la comparación de la matriz de turbinas con la matriz del polígono priorizado, considerando una distancia de 10 diámetros aguas abajo y se obtuvo una capacidad instalable de 64 MW.



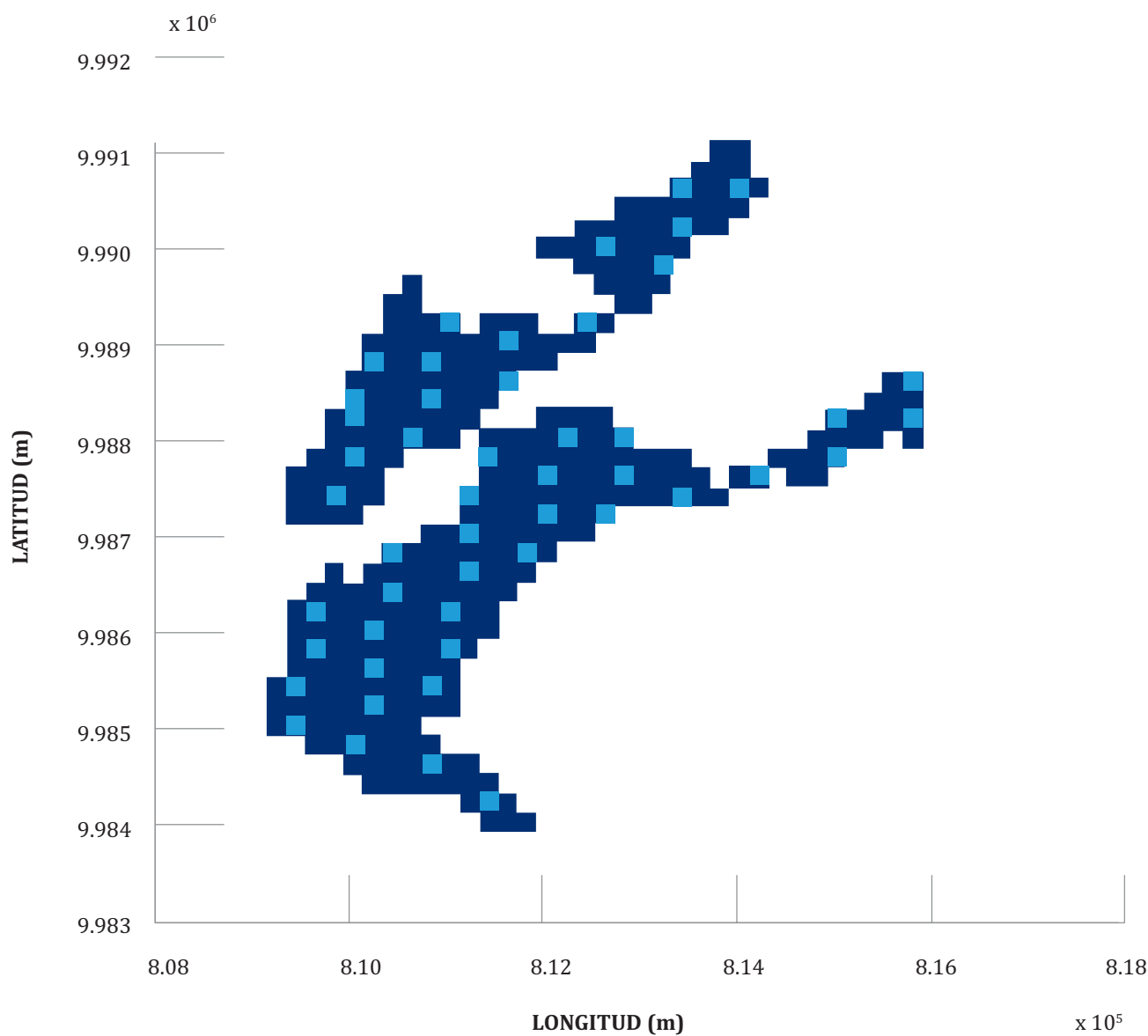
Figura 7. Distribución de turbinas en polígono priorizado, 10 diámetros aguas abajo



Fuente: Elaboración propia

En la figura 8 se puede observar la distribución de las turbinas a una distancia de 7 diámetros aguas abajo, en la cual se podrían instalar 49 aerogeneradores y obtener 98 MW.

Figura 8. Distribución de turbinas en polígono priorizado, 7 diámetros aguas abajo



Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta la Tabla 1 con diferentes distribuciones de turbinas y la capacidad instalable de un parque con esas distribuciones.

Tabla 1. Capacidad Instalable

Diámetro aguas abajo	Diámetro entre turbinas (laterales)	Número de turbinas	Capacidad instalable (MW)
10	4	32	64
9	4	39	78
8	4	46	92
7	4	49	98

Fuente: Elaboración propia

## **En el polígono priorizado de Quito-Loma se podrían ubicar máximo 49 aerogeneradores, obteniendo una capacidad instalable de 98MW.**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Para emplazamientos que tengan dirección predominante de viento se puede distribuir las turbinas de manera uniforme con distancias aguas abajo de 10 diámetros y 4 diámetros a los lados.

La metodología aplicada permitió calcular la capacidad instalable en el emplazamiento priorizado en cada uno de los escenarios, es decir a 10, 9, 8 y 7 diámetros de rotor aguas abajo, la diferencia en la potencia instalada entre los escenarios con distancia mínima de 7 diámetros y con distancia máxima de 10 diámetros es de 34.69%, lo cual representa una reducción de 34 MW.

En el polígono priorizado de Quito-Loma se podrían ubicar máximo 49 aerogeneradores considerando la metodología aplicada en este trabajo, obteniendo una capacidad instalable de 98MW.

La selección de un escenario óptimo para determinar la capacidad instalable de un parque eólico debe realizarse en función de la forma del polígono priorizado en estudio ya que normalmente no presentan formas geométricas definidas. Esto aumenta la complejidad para aprovechar el polígono de tal forma que las turbinas no sean afectadas por el efecto estela producido en el parque.

Como trabajo futuro se pretende realizar el micrositing mediante una optimización del algoritmo utilizado para emplazamientos con direcciones predominantes junto con un análisis CFD que determine el factor de rendimiento del futuro parque eólico.

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- González Martínez, J. E. (2014). Layout Optimization of offshore wind farms with realistic constraints and options. (Master of Science), Delft University of Technology.
- Jensen, N. O. (1983). A note on wind generator interaction
- MEER, M. d. E. y. E. R. (2013). Atlas Eólico del Ecuador
- Mittal, P., Kulkarni, K., & Mitra, K. (2015). A Novel and Efficient Hybrid Optimization Approach for Wind Farm Micro-siting. *IFAC-PapersOnLine*, 48(8), 397-402. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.214>
- Samorani, M. (2013). The Wind Farm Layout Optimization Problem. In P. M. Pardalos, S. Rebennack, M. V. F. Pereira, N. A. Iliadis & V. Pappu (Eds.), *Handbook of Wind Power Systems* (pp. 21-38). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sathyajith, M. (2006). Wind Energy Fundamentals, Resource, Analysis and Economics. In S.-V. B. Heidelberg (Ed.), *Wind Energy* (pp. 246).
- Serrano González, J., Burgos Payán, M., Santos, J. M. R., & González-Longatt, F. (2014). A review and recent developments in the optimal wind-turbine micro-siting problem. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 133-144. doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.027>
- Şişbot, S., Turgut, Ö., Tunç, M., & Çamdalı, Ü. (2010). Optimal positioning of wind turbines on Gökçeada using multi-objective genetic algorithm. *Wind Energy*, 13(4), 297-306. doi: 10.1002/we.339
- Talayero, A., & Telmo, E. (2011). *Energía Eólica* (P. Universitarias Ed. segunda ed.). España.
- Villacreses, G., Gaona, G., Martínez-Gómez, J., & Jijón, D. J. (2017). Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador. *Renewable Energy*, 109, 275-286. doi: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.041>