

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Programa Universitario de Investigación en Ciencias Básicas

(nombre del programa universitario de investigación de la Digi)

Análisis comparativo de tecnologías sustitutivas para la medición del potencial eólico en las instalaciones del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur

nombre del proyecto de investigación

4.8.42.0.81

Partida presupuestaria

AP9CU-2022

código del proyecto de investigación

Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur ITUGS

unidad académica o centro no adscrito a unidad académica avaladora

Sergio Alejandro López Rodríguez

nombre del coordinador del proyecto y equipo de investigación contratado por Digi

Palín Escuintla 28/11/2022

lugar y fecha de presentación del informe final dd/mm/año

Autoridades

Dra. Alice Burgos Paniagua
Directora General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Nombre Coordinador(a) del Programa de Investigación
Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar

Autores

Nombre del coordinador(a) del proyecto

Sergio Alejandro López Rodríguez

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación (Digi), 2022. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria 4.8.42.0.81 con código AP9CU-2022 en el Programa Universitario de Investigación en Ciencias Básicas.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.



Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección General de Investigación



1 Índice general

2. Resumen y palabras clave	6
3. Introducción	7
4. Planteamiento del problema	8
5. Delimitación en tiempo y espacio.....	10
5.1 Delimitación en tiempo	10
5.2 Delimitación espacial.....	10
6. Marco teórico	11
6.1 Energía eólica.....	11
6.2 El viento como recurso para generar energía.....	12
6.3 Análisis de sitios para generación de energía eólica.	13
6.4 El viento y su potencial	14
6.5 Medición del potencial eólico	14
6.6 Anemómetros	15
6.7 Medición de la dirección del viento	16
6.8 Instalación de los instrumentos de medición del viento	17
6.9 Variación de las características del viento con la altura	18
6.10 Influencia del relieve del terreno en la medición del viento.	19
6.11 Tratamiento estadístico del viento.	20
6.12 Rosas de viento.	21
6.11 Potencial eólico	21
7. Estado del arte.....	23
8. Objetivos	31
9. Hipótesis.....	31
10. Materiales y métodos	31
10.1 Enfoque de la investigación	31
10.2 Método.....	32
10.3 Área de estudio	32

10.4 Descripción de los métodos.....	33
10.5 Recolección de información.....	39
10.6 Procesamiento y análisis de la información	42
11. Resultados y discusión	44
11.1 Resultados	44
11.1.1 Sistemas por mástil y sistema por dron.....	44
11.1.2 Sistemas por mástil y sistema elevado por globos inflados con helio	49
11.1.3 Análisis comparativo de las cualidades de los sistemas	54
11.1.4 Potencial eólico del sitio investigado.....	59
11.2 Discusión de resultados.....	60
12. Referencias.....	65
13. Apéndice.....	69
14. Aspectos éticos y legales.....	78
15. Vinculación	78
16. Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual.....	78
17. Aporte de la propuesta de investigación a los ODS	78
18. Orden de pago final	79
19. Declaración del Coordinador(a) del proyecto de investigación	79
20. Aval del Director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario	79
18. Visado de la Dirección General de Investigación.....	80

1.2 Índice de tablas

1. Equivalencias grado-orientación cardinal.....	43
2. Resumen de las pruebas de diferencia entre medias.	50
3. Ventajas y limitaciones de cada sistema de monitoreo	54

1.3 Índice de Figuras

1. Ubicación ITUGS	10
2. Ejemplo de anemómetro de cazoletas con veleta integrada.	16
3. Efectos de obstáculos en la medición del viento	17
4. Efecto del perfil del viento en función de la altura de medición.....	18
5. Efecto de la forma de las colinas en el comportamiento del viento.	19
6. Ejemplo de una distribución Weibull para datos de velocidad del viento.....	20
7. Ubicación del área para el desarrollo de la investigación	32
8. Proceso de fabricación del mástil	33
9. Accesorios de unión del mástil	34
10. Instalación del mástil	35
11. Anemómetro PCE FWS 20N.....	36
12. Sistema por dron	37
13. Sistemas por globos inflados con helio	38
14. Circuito electrónico para automatización de anemómetro A 420	39
15. Ejemplo de los datos obtenidos con el sistema de monitoreo tipo mástil.....	40
16. Ejemplo de los datos obtenidos con el sistema de monitoreo tipo dron	40
17. Ejemplo de los datos obtenidos del sistema elevado con globos	41
18. Ejemplo de representaciones gráficas para comparaciones	42
19. Ejemplo de representación de la información con WRPLOT	44
20. Gráficas lineales datos mástil-dron septiembre	46
21. Gráficas lineales datos mástil-dron octubre	47
22. Rosas de viento mástil-dron	48
23. Graficas lineales mástil-globo septiembre	51
24. Graficas lineales mástil-globo octubre	52
25. Rosas de viento mástil-globo	53
26. Rosa de viento monitoreo en mástil	59
27. Distribución de los datos obtenidos del instrumento instalado en el mástil	60

2 Resumen y palabras claves

La presente investigación tiene como objetivos la construcción de tres tipos de sistemas de monitoreo para la medición de potencial eólico, medir la velocidad y dirección del viento para establecer el potencial eólico con la utilización de cada sistema y comparar los datos obtenidos con cada uno de ellos. Los ensayos se realizaron en las instalaciones del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur ITUGS. Para la comparación se desarrollaron tres métodos denominados por mástil, por elevación con el uso de un dron y por elevación con globos inflados con helio. Las mediciones de la velocidad del viento se obtuvieron con el uso de anemómetros de cazoletas en cada sistema a 10 y 15 m de altura, con una frecuencia de medición de 5 minutos. Se realizaron comparaciones de los datos obtenidos en cada monitoreo con el uso de pruebas de diferencias entre medias, gráficas lineales y rosas de viento. Los resultados demostraron un 68.75% de igualdad entre las medias de los datos del sistema por mástil y elevado por dron, además, un 40% de igualdad entre las medias de los datos del sistema por mástil y elevado por globo. Como consecuencia del estudio se puede afirmar que, para la medición del potencial eólico el sistema por mástil es el más confiable, debido a su capacidad de continuidad en la medición a largo plazo.

Palabras clave: anemómetro, dron, globo, rosa de viento, viento

Abstract and keyword

The present investigation has as objectives the construction of three types of monitoring systems for the measurement of wind potential, to measure the speed and direction of the wind to establish the wind potential with the use of each system and to compare the data obtained with each one of them. . The tests were carried out at the facilities of the Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur ITUGS. For the comparison, three methods called by mast, by elevation with the use of a drone and by elevation with balloons inflated with helium were developed. Wind speed measurements were obtained with the use of cup anemometers in each system at 10 and 15 m height, with a measurement frequency of 5 minutes. Comparisons of the data obtained in each monitoring were made with the use of tests of differences between means, linear graphs and wind roses. The results showed a 68.75% equality between the means of the system data per mast and elevated by drone, in addition, a 40% equality between the means of the system data per mast and elevated per balloon. As a consequence of the study, it can be affirmed that, for the measurement of wind potential, the mast system is the most reliable, due to its capacity for continuity in long-term measurement.

Keywords: anemometer, drone, balllon, wind rose, wind

3 Introducción

El viento y su presencia como recurso para la generación de energías limpias han presentado la posibilidad de su explotación a nivel mundial, y cada vez más se requiere de este tipo de energías con el objetivo de frenar los impactos del cambio climático por consumo de combustibles fósiles en generación de energía eléctrica (Vega y Ramírez 2014).

La posibilidad de aprovechar la energía del viento necesita de una transformación. Una máquina denominada generador eólico ofrece la posibilidad de transformar la energía cinética del viento en electricidad, cuando esta es tomada de una turbina eólica. (Moro, 2013)

Estas máquinas son diversas y tienen modelos específicos según el sitio donde se deseen instalar, esto se debe en gran medida a que el viento presenta mucha variabilidad en su magnitud, dirección y frecuencia, en dependencia directa del sitio donde se instale, la estación del año que esté presente y las condiciones climáticas que gobiernan una región en particular (González-Rocha, et. al. 2019). Lo que conduce a que la generación de energía eólica requiere de unas consideraciones particulares previo a instalar un equipo de generación.

El estudio de potencial eólico se refiere a un análisis prolongado de las condiciones o caracterización del viento en un sitio de interés. Se requiere de mediciones de la velocidad, dirección, frecuencia, altura y condiciones climáticas que gobiernen un sitio específico donde se desee realizar la instalación de una turbina eólica, estos estudios pueden durar meses o años, en dependencia del tipo de proyecto de generación que se desee instalar en el lugar que se analiza (Boveri, 2012).

De forma ordinaria el estudio se lleva a cabo con la instalación de un mástil con instrumentos de medición a diferentes alturas, durante un tiempo prudente que refleje con datos obtenidos, la caracterización del viento. Sin embargo, este tipo de instalaciones pueden ser dificultosas y costosas de instalar en varios sitios de interés para generación de energía eólica (Vasiljević, et al., 2020).

Por este motivo es importante analizar opciones para realizar esta labor, ya que algunos lugares donde el viento es un recurso que cuenta con altas cantidades y calidades, como el mar abierto o laderas en colinas de perfil suave, no es posible la instalación de un mástil para monitoreo (Giebel, et al., 2012).

La investigación que se presenta explora la comparación de dos sistemas de monitoreo diferentes con el sistema ordinario de tipo mástil. Un sistema emplea el uso de un anemómetro montado sobre un dron a control remoto y el otro sistema está basado en la elevación de un anemómetro por medio de globos inflados con helio. Con los datos obtenidos de ambos sistemas, se realiza una comparación de la información recolectada durante jornadas de monitoreo eólico con un anemómetro y veleta instalados en un mástil de 10 y 15 metros.

Para la comparación se realizan gráficas tipo lineal y Rosas de viento, con la finalidad de realizar una observación del comportamiento, la magnitud y frecuencia de las similitudes o cambios en cada monitoreo del viento. Se presentan al finalizar los resultados y la discusión de los mismos con otras investigaciones similares encontradas en la búsqueda bibliográfica sobre el tema.

4 Planteamiento del problema

Se requiere analizar tecnologías sustitutivas para la medición de potencial eólico en un sitio particular, ya que la tecnología de tipo mástil puede complicarse en ciertos lugares de difícil acceso.

En este sentido Giebel y colaboradores (2012) menciona que la tecnología de medición que involucra el uso de un mástil puede ser una limitante en la consideración de algunos sitios que se requiera monitorear:

En altitudes bajas, por debajo de los 100 m, las mediciones del viento en ubicaciones puntuales generalmente se realizan con el uso de anemómetros montados en mástiles altos. Si bien los mástiles pueden proporcionar mediciones continuas de larga duración, son difíciles y costosos de colocar y solo ofrecen un número limitado de posiciones de detección lateral una vez erigidos. Esto puede ser una limitación importante para aplicaciones que requieren mediciones en varios lugares con alta resolución espacial, como alrededor de edificios y en sitios de turbinas eólicas (p.197).

De igual forma González-Rocha, J. y colaboradores (2019), expresan las dificultades técnicas al momento de monitorear un sitio de difícil acceso, pero que puede llegar a contar con un potencial eólico adecuado:

Convencionalmente, el viento en la capa límite atmosférica, se mide con sensores in situ montados en torres, globos meteorológicos o aviones tripulados o con sensores remotos como SoDAR y LiDAR. Sin embargo, estos sensores pueden ser costosos y limitados en su capacidad para admitir mediciones de viento específicas a lo largo de toda la extensión de la capa límite atmosférica debido a restricciones de instalación, particularmente en terrenos complejos (p.837).

Según Burton, T., et al., (2011) en la determinación del potencial eólico de un sitio en particular, la medición del viento es el parámetro más significativo:

La velocidad del viento es el parámetro más crítico que debe medirse para establecer el potencial eólico de un lugar, ya sea sobre la tierra o sobre el mar, por lo que se debe poner un énfasis considerable en su precisión. La velocidad del viento que se mide debe ser lo más

representativa posible del viento que habría estado presente en el plano del rotor en ausencia de la turbina eólica. La velocidad deseada nunca existe y, por lo tanto, se selecciona una velocidad agua arriba adecuada en su lugar. (p.13)

Por lo tanto, la medición del potencial eólico con tecnologías sustitutivas al mástil requiere atención especial, debido a la necesidad cada vez más amplia de ubicar generadores eólicos en diversidad de sitios a nivel nacional y global donde no puedan emplearse mástiles de forma simple.

5 Delimitación en tiempo y espacio

5.1 Delimitación en tiempo

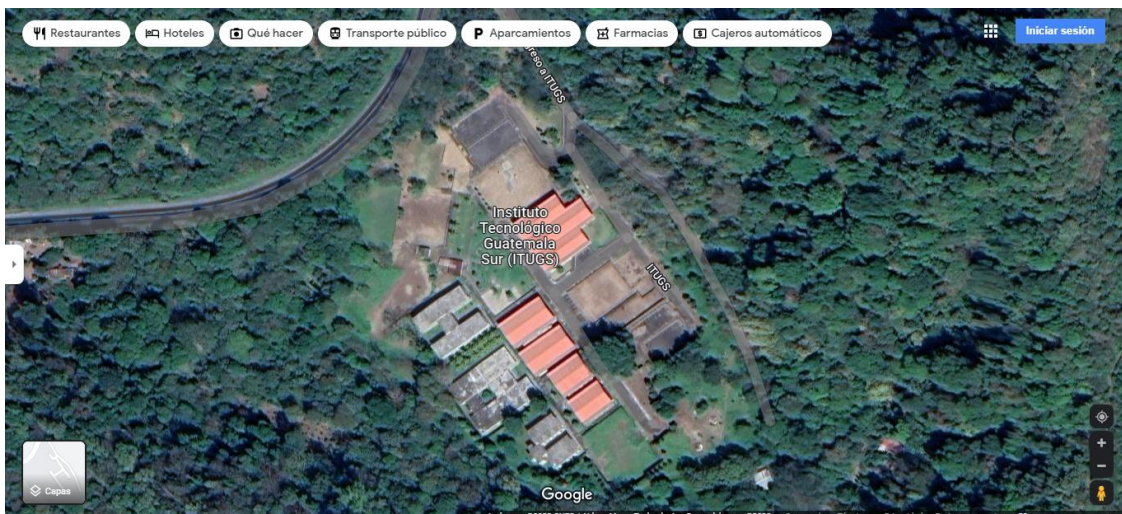
Fecha de inicio 1 de febrero de 2022, fecha de finalización 30 de noviembre de 2022, fueron 10 meses.

5.2 Delimitación espacial

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur ITUGS, véase Figura 1.

Figura 1

Ubicación ITUGS



Nota: la dirección de ITUGS es km 45 carretera antigua a Pálin Escuintla Guatemala.

Tomada de:

[https://www.google.com/maps/place/Instituto+Tecnol%C3%B3gico+Guatemala+Sur+\(ITUGS\)/@14.3748141,90.7232843,361m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0xa33127c2c612b4a4!8m2!3d14.3748141!4d-90.7232843](https://www.google.com/maps/place/Instituto+Tecnol%C3%B3gico+Guatemala+Sur+(ITUGS)/@14.3748141,90.7232843,361m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0xa33127c2c612b4a4!8m2!3d14.3748141!4d-90.7232843)

6 Marco teórico

6.1 Energía eólica.

La atención prestada recientemente al cambio climático, la necesidad de incrementar la cuota de energía limpia y el temor ante una menor disponibilidad del petróleo en el futuro han renovado el interés en la producción de energía de fuentes renovables y, por tanto, también de la eólica. Este tipo de energía, a diferencia de otras energías renovables, exige inversiones menores y utiliza un recurso natural disponible habitualmente en todas partes y especialmente aprovechable en las zonas templadas, donde se encuentran la mayoría de las naciones desarrolladas industrialmente (Boveri, 2012).

Mediante la energía eólica se podrían reducir considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), tanto a corto (2020) como a largo plazo (2050). La capacidad eólica instalada al término de 2009 logró cubrir aproximadamente un 1,8% de la demanda eléctrica mundial, porcentaje que podría superar el 20% en 2050, de mediar un esfuerzo ambicioso por reducir las emisiones de GEI y por superar otros obstáculos que dificultan su expansión. La implantación de la energía eólica en tierra firme avanza ya a buen ritmo en muchos países, sin que existan obstáculos técnicos insuperables que se opongan a una mayor penetración de esa forma de energía en los sistemas de suministro eléctrico. Además, aunque la velocidad promedio del viento varía considerablemente en función del lugar, en la mayoría de las regiones del mundo el potencial técnico de implantación de la energía eólica es elevado. En algunas zonas con recursos eólicos abundantes, el costo de la energía eólica es ya competitivo en términos de los precios del mercado actual, incluso sin tomar en cuenta los impactos medioambientales relativos. No obstante, en la mayoría de las regiones del mundo sigue siendo necesario adoptar medidas que faciliten una rápida implantación (Edenhofer, 2011).

La exploración y explotación de energía eólica se ha convertido cada vez más en un impulso económico importante para reducir la exposición de las economías a la volatilidad de los precios de los combustibles. Este es especialmente el caso de las economías que dependen del combustible importado de países políticamente inestables. Como cualquier otro sistema energético, los costes básicos de la energía eólica están determinados por diversos factores como; costos de inversión inicial, costos de instalación de turbinas eólicas, costo de capital, costos de operación y

mantenimiento, otros costos de planificación y desarrollo de proyectos, vida útil de la turbina y costo de producción de electricidad. Aproximadamente el 75 % del costo total de la energía de una turbina eólica está relacionado con los costos iniciales, como el costo de la turbina, los cimientos, el equipo eléctrico, la conexión a la red y pronto. El servicio y mantenimiento de las turbinas eólicas constituye una parte considerable de los costos anuales totales de una turbina eólica. Sin embargo, en comparación con la mayoría de los otros costos de generación de energía, son muy bajos (Ishugah et al., 2014).

Desde el punto de vista de energía eólica, la característica más llamativa del viento como recurso es su variabilidad. El viento es altamente variable, geográfica y temporalmente. Sin embargo, esta variabilidad persiste en un muy amplio rango de escalas, ambas en tiempo y espacio. La importancia de esto se amplifica por la relación cúbica con la energía disponible (Burton et al., 2011).

Debido a su variabilidad y aleatoriedad deben aplicarse técnicas estadísticas para su análisis. En el proceso de caracterización del viento intervienen los siguientes aspectos: toma de datos, magnitudes a medir (velocidad, dirección), procedimiento de medición, frecuencia de muestreo y periodos de promedio; técnica de medición, aparatos de medida (anemómetro, veleta, entre otros) y colocación del instrumental de medida y métodos de tratamiento de datos, técnicas estadísticas, forma de presentación de los resultados (valores medios horarios, diarios, anuales, rosa de los vientos, entre otros) y distribuciones de probabilidad (López, 2012).

6.2 El viento como recurso para generación de energía.

Con el fin de aprovechar la energía eólica, es muy importante tener en cuenta las grandes variaciones de velocidad entre diferentes zonas: lugares que apenas distan unos kilómetros entre sí pueden estar sujetos a condiciones de viento muy dispares y suscitar un interés muy distinto a la hora de instalar un aerogenerador. La fuerza del viento cambia en cuestión de días, horas o minutos, en función de las condiciones meteorológicas. Además, la dirección y la intensidad del viento fluctúan rápidamente en torno al valor medio: se trata de las turbulencias, que son una característica importante del viento, ya que determinan las fluctuaciones de la fuerza ejercida sobre las palas de las turbinas, de esta forma se aumenta así su desgaste y se reduce su vida media. En

tierra, el nivel de turbulencias puede variar entre el 15% y el 20%, mientras que en mar abierto este valor puede estar comprendido entre el 10% y el 14% (Boveri, 2012).

La cantidad de energía (mecánica o eléctrica) que pueda generar una turbina o parque eólico depende de las características preponderantes del viento en el sitio de instalación. La producción energética y, por consiguiente, la rentabilidad del proyecto, puede variar en gran medida en función de los vientos locales del emplazamiento. Un estudio técnico detallado de las características del viento ajustado a las características específicas de cada ubicación es imprescindible antes de avanzar en un proyecto de cualquier magnitud. El método más exacto para conocer el potencial de producción de energía del viento es la instalación de unos equipos de medición en el lugar objeto de estudio para conocer los datos reales de velocidad, dirección y variabilidad del viento. Estos datos se analizan detalladamente en relación con las características del terreno y las mediciones de estaciones meteorológicas cercanas, con el fin de estimar la producción potencial de energía a largo plazo y durante diferentes épocas del año (Romero, 2017).

Hay tres componentes del viento que determinan la potencia disponible de un sistema de conversión de energía eólica, velocidad del viento: es un parámetro crítico, porque la potencia varía según el cubo de la velocidad del viento; una o dos veces más alta significa ocho veces más de potencia, características del viento (turbulencia), mientras que los modelos de viento globales ponen el aire en movimiento y determinan, a grandes rasgos, el recurso del viento en una región, rasgos topográficos locales, que incluyen formaciones geográficas, flora y estructuras artificiales, pueden mostrar la diferencia entre un recurso eólico utilizable y uno que no lo es, densidad del aire, temperaturas bajas producen una densidad de aire más alta. Mayor densidad significa más fluidez de las moléculas en un volumen de aire dado, y más fluidez de las moléculas encima de una pala de la turbina produce un rendimiento más alto de la potencia, para una velocidad del viento dada (Romero, 2017).

6.3 Análisis de sitios para generación de energía eólica.

López (2012) expresa que los parámetros meteorológicos que influyen sobre el emplazamiento, operación y diseño de un parque eólico son los siguientes: velocidad del viento y sus variaciones diurnas, estacionales o interanuales, densidad de probabilidad de la velocidad del viento, distribución de direcciones y probabilidades de cambios bruscos de dirección, variabilidad de la

dirección del viento, presencia de ráfagas, frecuencia y duración de las mismas, variación de la velocidad y de la dirección del viento con la altura, variaciones de la temperatura y densidad del aire, características de las series temporales de vientos y de calmas, frecuencia de condiciones externas de viento y condiciones atmosféricas especiales.

6.4 El viento y su potencial.

Actualmente se busca aprovechar los recursos renovables para la generación de energía eléctrica, entre los cuales el viento es uno de los más estudiados y con mayor ritmo de crecimiento a nivel mundial en cuanto a potencia de generación instalada. Pero el viento, al considerarlo como recurso energético y desde el punto de vista de su disponibilidad como suministro, es una fuente con sustanciales variaciones temporales, a pequeña y gran escala de tiempo, y espaciales, tanto en superficie como en altura, contando además con una componente aleatoria que afecta en gran parte a su variación total (Samela, 2010).

Las características locales del viento influyen de manera significativa en varios aspectos fundamentales relacionados con los sistemas de aprovechamiento de la energía eólica, en la selección del emplazamiento más favorable para la instalación de los sistemas eólicos. en la estimación o previsión de la producción energética y del funcionamiento global del sistema eólico, dado que la energía eólica disponible por unidad de área expuesta al viento es proporcional al cubo de la velocidad, por lo que pequeñas variaciones en la velocidad del viento conllevan sensibles variaciones en la energía suministrada, y por ende impacta en la rentabilidad del proyecto, en el diseño estructural del sistema, donde se tienen en cuenta las condiciones medias representativas y condiciones extremas de viento, en la operación y regulación del sistema eólico, donde intervienen aspectos como la predicción del viento para planificar el funcionamiento en tiempo real, así como características del viento que influyen en la estrategia de operación (arranque, parada, orientación) y factores que afectan al mantenimiento o vida útil del sistema, variabilidad en la dirección, ráfagas, superación de la velocidad de operación del aerogenerador (Samela, 2010) .

6.5 Medición del potencial eólico

A la hora de evaluar un emplazamiento hay que determinar las características del viento en el mismo, para lo cual habrá que considerar cada uno de los siguientes aspectos, condiciones

generales del viento en un emplazamiento (medias diarias, estacionales, anuales), datos de 10 minutos a 1 hora de promedio, condiciones meteorológicas (temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, densidad del aire), distribución de frecuencias de dirección, variación temporal de la velocidad, potencial eólico disponible, características del viento para el funcionamiento del sistema, datos de 10 minutos a 1 hora de promedio, perfil vertical de velocidad horizontal, variaciones temporales, relaciones con la dirección, variación de la velocidad vertical, relaciones entre el viento vertical y la dirección, relaciones entre el viento vertical y el horizontal, factores de ráfaga, relaciones entre la velocidad, dirección y factor de ráfagas, características de la turbulencia, relaciones entre dirección y turbulencia, relaciones entre velocidad y turbulencia, desviación de la velocidad (Mur, 2001).

Cuando se desea evaluar el potencial eólico de un lugar conviene realizar una campaña de medición del viento (velocidad y dirección), lo más larga posible, técnica y económicamente posible, como mínimo de un año y llevar a cabo mediciones a distintas alturas (10, 25, 50, 80 m) mediante el uso de una torre meteorológica (López, 2012).

6.6 Anemómetros

Son instrumentos mediante los cuales se registra la velocidad del viento. Actualmente, en el mercado existen anemómetros de múltiples formas, tamaños y principios de funcionamiento, sin embargo para medición de potencial eólico los más empleados son los anemómetros de cazoletas y sónicos. Los anemómetros de cazoletas (véase Figura 2) poseen tres cazoletas montadas simétricamente alrededor de un eje vertical. Debido a que la fuerza que ejerce el viento en el lado cóncavo es mayor que en lado convexo, el bloque gira. El instrumento proporciona una salida analógica proporcional a la velocidad del viento, la frecuencia de los pulsos indica la velocidad de viento. Los anemómetros de cazoletas presentan la ventaja de ser sensores robustos y relativamente baratos, sin embargo, deben tenerse en cuenta al menos tres fuentes de posibles errores en su utilización, par de fricción en los rodamientos, efectos dinámicos y características de respuesta angular (Talayero, 2011).

Figura 2.

Ejemplo de anemómetro de cazoletas con veleta integrada.



Nota: el anemómetro de cazoletas es el instrumento más común para la medición de la velocidad del viento en estudios eólicos. Tomada de (Boveri, A. B., & ABB, S. 2012).

Es importante que el anemómetro presente las siguientes características: linealidad entre la velocidad del viento y la señal de salida, la medida de la velocidad no debe verse afectada por las variaciones de densidad, temperatura, presión y humedad del aire, precisión ya que la potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad. Un error del 10% en la medición de la velocidad se traduce en un error del 33% en el cálculo de la energía. Este error puede aumentar si se extrapolan las mediciones a 10 m de alturas superiores correspondientes al buje de la turbina, y calibración debido a que el anemómetro debe calibrarse periódicamente para asegurar la fiabilidad y precisión de las medidas (López, 2012).

6.7 Medición de la dirección del viento.

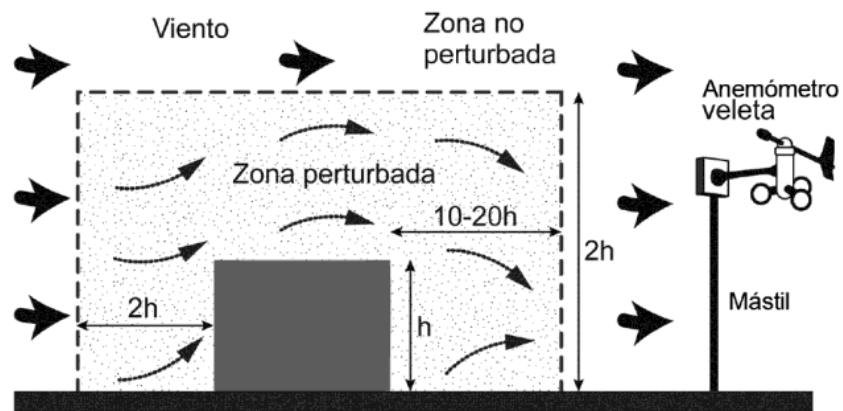
El elemento empleado tradicionalmente para medir la dirección del viento es una veleta, que consiste en un dispositivo montado sobre un eje vertical y de giro libre, de tal modo que puede moverse cuando el viento cambia de dirección. Normalmente, el movimiento de la veleta está amortiguado para prevenir cambios demasiado rápidos de la dirección del viento. Así mismo, puede obtenerse una medida de la dirección del viento resolviendo los registros de salida de dos anemómetros de hélice dispuestos ortogonalmente (Mur, 2001).

6.8 Instalación de los instrumentos de medición del viento.

La colocación de los sensores (anemómetro y veleta) debe ser en un lugar despejado, libre de perturbaciones provocadas por obstáculos próximos, ya que estos perturban notablemente la velocidad y dirección del viento. En general un obstáculo de altura h (véase Figura 3), perturba el flujo de aire a una distancia $2h$ a barlovento y de $10h$ a $20h$ a sotavento. En la dirección vertical la perturbación puede alcanzar hasta una altura $2h$. (López, 2012)

Figura 3.

Efectos de obstáculos en la medición del viento



Nota: para la medición adecuada de las variables del viento, se recomienda considerar un sitio libre de obstáculos, o que los mismos se encuentren a distancias prudentes de la colocación de los instrumentos. Tomada de (López, 2012).

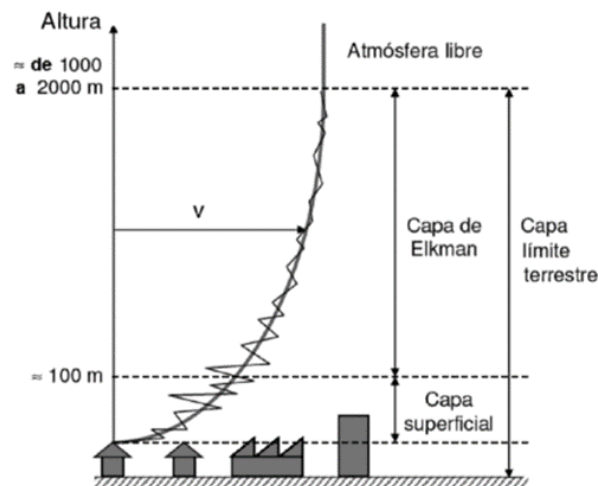
La colocación del conjunto anemómetro y veleta se realiza en un mástil. En estaciones meteorológicas fijas se coloca a una altura de 10 m sobre el suelo para minimizar las perturbaciones. Para minimizar el abrigo del viento, en lugar de una torre de celosía, se utilizan postes cilíndricos delgados, tensados con cables o vientos. Si el anemómetro se coloca en la parte lateral del mástil debe enfocarse en la dirección de viento dominante para minimizar el abrigo de la torre. En estaciones móviles o semipermanentes se aceptan alturas de 2 a 3 m (Mur, 2001).

6.9 Variación de las características del viento con la altura

La velocidad del viento se incrementa ligeramente con la altura (véase Figura 4), tiende a un límite que se alcanza aproximadamente en el denominado gradiente de altura, que se encuentra en torno a 1 000 m por encima del nivel del suelo. La variación de la velocidad del viento con la altura depende, en cierta medida de la estabilidad atmosférica. Si un volumen de aire es desplazado verticalmente (y adiabáticamente), tendera a volver a su localización original si la atmosfera es estable. Si permanece en la localización a la que ha sido desplazada, se dice que la atmósfera está neutralmente estable. En una atmósfera inestable continuará desplazándose en la dirección en que se ha movido. Cuanto más inestables sean las condiciones, mayor mezcla, con el resultado de que los gradientes de velocidad son menores. Debido a que generalmente, no coinciden las alturas del buje de los aerogeneradores con las de toma de datos de las estaciones meteorológicas, será preciso extrapolar la serie de viento con relación a la altura, para ello, se suele calcular el perfil en la estación, según la dirección. De esta forma, se toma en cuenta las particularidades (orografía, cambio de rugosidad, posibles obstáculos) que hay en cada rumbo (Talayero, 2011).

Figura 4.

Efecto del perfil del viento en función de la altura de medición.



Nota: el viento puede cambiar en magnitud de velocidad de forma exponencial, al variar la altura en la cual se mide hasta una zona denominada capa límite terrestre. Tomada de (López, 2012).

6.10 Influencia del relieve del terreno en la medición del viento.

En las proximidades de la superficie terrestre, aparte del rozamiento intervienen también las alteraciones orográficas y los obstáculos del terreno, colinas, muelas, rocas, edificaciones, entre otras, que producen determinados efectos en el viento el conocimiento de estos efectos es de gran interés para el aprovechamiento de la energía eólica, bien para aprovecharlos o evitarlos (Cucó, 2017).

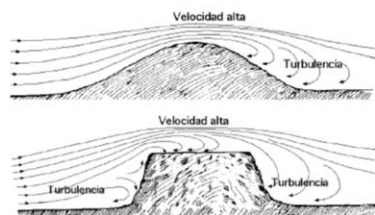
Una colina suave (véase Figura 5), con pendiente sin vegetación alta u obstáculos y cima redondeada es un buen lugar para la instalación de aerogeneradores, que aprovechen el efecto acelerador del relieve, si la colina está próxima al mar, se recomiendan lugares situados a una distancia de la orilla entre 0,25 y 2,5 veces la altura de la colina (López, 2012).

El efecto de las edificaciones se traduce en la creación de una burbuja de turbulencias en la que no se debe situar aerogeneradores, por tanto una ubicación adecuada para el aerogenerador es colocarlo sobre una torre con una altura a dos veces la altura del obstáculo (Cucó, 2017).

La rugosidad del terreno tiene una gran influencia. En terrenos de baja rugosidad (por ejemplo la superficie del agua) el efecto de un obstáculo se prolonga, aguas abajo, a una distancia superior que en el caso de un terreno de mayor rugosidad. La velocidad y la potencia eólica disponible se mantienen a mayor distancia aguas abajo del obstáculo en el caso de elementos con mayor porosidad. El nivel de turbulencia en la zona posterior de los obstáculos porosos es menor que en el caso de obstáculos compactos o denominados de “porosidad nula” (López, 2012).

Figura 5.

Efecto de la forma de las colinas en el comportamiento del viento.



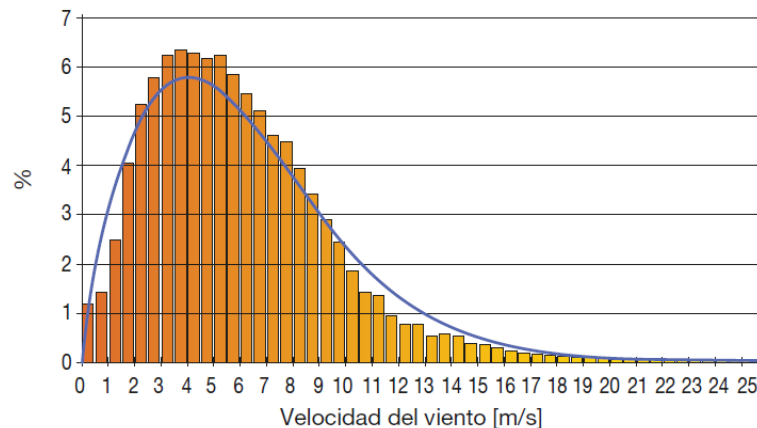
Nota: una colina más “suave” en su perfil es capaz de reducir los efectos de la turbulencia por el cambio sutil en su forma. Tomada de (López, 2012).

6.11 Tratamiento estadístico del viento.

La experiencia demuestra que las distribuciones reales del viento se ajustan bastante bien a la distribución de Weibull de dos parámetros (figura 6). En particular, para lugares donde la variabilidad del viento y la turbulencia son pequeñas, la distribución de Rayleigh de un solo parámetro ajusta bastante bien el comportamiento del viento. Esta última distribución es la que generalmente utilizan los fabricantes de turbinas eólicas para establecer sus especificaciones (Mur, 2001).

Figura 6.

Ejemplo de una distribución Weibull para datos de velocidad del viento.



Nota: para fines de interpretación de la información obtenida durante la medición en un sitio en particular, la distribución de Weibull ofrece una forma bastante acertada del comportamiento y frecuencias de la presencia de la velocidad del viento. Tomada de (Boveri, 2012).

El tratamiento estadístico del viento se realiza a partir de series de mediciones de la velocidad y dirección del viento en el lugar de estudio. La frecuencia de muestreo (frecuencia de medición) y la amplitud de intervalo de tiempo promedio (intervalos de tiempo en los que se promedian los N valores instantáneos para obtener un valor medio que se asigna a todo el intervalo) dependen del instrumental disponible, su nivel de automatización, la capacidad de tratamiento de datos y los fines que se persiguen (López, 2012).

6.12 Rosas de viento

Según Marcial (2019) que se refiere a lo expuesto por Escudero (2004), los meteorólogos crearon una gráfica llamada Rosa de los Vientos que permite representar simultáneamente la relación que existe entre las características que componen el viento. La Rosa de los Vientos es esencial para decidir el emplazamiento de una instalación eólica, pues las características direccionales del viento son muy importantes para decidir la ubicación del aerogenerador en terrenos no uniformes pero también para conocer la variabilidad direccional del régimen de vientos al que debe responder el sistema de orientación de la máquina.

6.13 Potencial eólico

Una masa de aire (m) con velocidad (v) posee una energía cinética (E_c) dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

El caudal másico del aire (m^*) de densidad (ρ) que fluye con velocidad (v) a través de una superficie de área (A) perpendicular a la dirección del flujo, es:

$$m * \rho Av$$

La potencia disponible (P_d) del caudal de aire que atraviesa dicha sección es:

$$P_d = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

La potencia eólica disponible es proporcional a la densidad del aire, al área perpendicularmente al flujo del viento y al cubo de su velocidad. La potencia eólica disponible es la máxima potencia que se podría obtener del viento si se pudiera extraer del mismo toda su energía cinética. Debido a diversas limitaciones, límite de Betz, pérdidas aerodinámicas y mecánicas, rendimiento del generador eléctrico, entre otras, solo permiten en la práctica aprovechar como máximo alrededor de un 45% al 50% de la potencia eólica disponible (López, 2012).

La densidad de potencia disponible o potencia disponible por unidad de área (P_d/A):

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2}\rho v^3$$

De la expresión anterior es posible mencionar:

La densidad de potencia depende linealmente de la densidad del aire. Un aire frío tiene una densidad de potencia superior a uno más caliente. Así mismo, y a igualdad de temperatura, un lugar situado al nivel del mar presenta una densidad de potencia mayor que a otro a mayor altitud, dado que la densidad del aire disminuye con la altura (López, 2012).

En conclusión, la estimación de la energía disponible en un determinado lugar está basada en una prospección eólica previa de velocidades, frecuencias y direcciones del viento en la zona, condiciones que permiten conocer el comportamiento del viento y las características que más afectan al diseño, funcionamiento y emplazamiento de los sistemas eólicos con los siguientes resultados:

- Distribución de velocidades medias del viento, y sus variaciones diurnas, estacionales e interanuales.
- Distribución de probabilidad de velocidades
- Distribución de frecuencias de dirección (rosa de viento).
- Variación del viento con la altura.
- Variaciones estacionales y diurnas de la densidad del aire y variaciones de la densidad con la altura.
- Interacciones de estelas entre máquinas en parques eólicos
- Influencia de la topografía
- Estadística de ráfagas y valores extremos de viento
- Condiciones atmosféricas especiales (hielos, arena, salinidad)

El relieve y las irregularidades de la superficie terrestre o marina tienen un impacto significativo en el viento y sus características locales. El viento sopla con más intensidad sobre superficies grandes y llanas como el mar, por ello el interés por las implantaciones de las instalaciones eólicas tanto *onshore* (dentro de tierra) como *offshore* (en el mar). El viento toma fuerza en las cumbres de las montañas o en los valles paralelos a la dirección del viento dominante, mientras que se frena sobre superficies irregulares, tales como ciudades o bosques, y su velocidad en relación a la altura sobre el suelo varía según las condiciones de estabilidad atmosféricas, esto condiciona también la elección de emplazamientos (Romero, 2017).

7 Estado del arte

La variabilidad del viento y las características de los sitios donde se requiere monitorear, hacen de la medición de la velocidad y dirección del viento actividades de desafío continuo.

Lo primero que se debe comprender es que el viento tiene variación en su comportamiento, en términos de magnitud de velocidad, dirección, presencia durante el día y de forma estacional durante el año.

De esta forma González-Rocha y colaboradores (2019), mencionan que la capa límite atmosférica es la zona útil para utilizar el viento como recurso, sin embargo, es la zona más variable en términos de velocidad y continuidad de las condiciones del viento:

Las variaciones en la capa límite atmosférica, ocurren diariamente y están dominadas por la presencia de turbulencia generada por efectos de cizallamiento, inercia y flotabilidad. Durante el día, cuando la superficie de la Tierra se calienta, se produce una fuerte turbulencia por convección libre y el calor se transfiere de la superficie a la atmósfera. Por la noche, la superficie se enfría debido a la pérdida de radiación de onda larga. La turbulencia débil e intermitente durante la noche se debe principalmente a la cizalladura. Este ciclo de calentamiento y enfriamiento superficial y turbulencia hace que la capa límite atmosférica varíe en profundidad desde aproximadamente 100 m por la noche hasta unos pocos kilómetros por la tarde. La caracterización precisa de la capa límite atmosférica requiere una resolución adecuada de las mediciones temporales y espaciales durante largos períodos y escalas de altura muy variables (p.2).

Aunado a las variaciones del viento se debe considerar también que la determinación del potencial eólico, o la cantidad de energía que el viento puede aportar a un generador, requiere de mediciones confiables y continuas en el tiempo, al respecto Ingenhorst y colaboradores (2021) argumentan que:

Los emplazamientos de parques eólicos en terrenos complejos están sujetos a fenómenos eólicos locales, que tienen un impacto relevante en la producción anual de energía de un aerogenerador. Por lo tanto, para reducir el riesgo de inversión, es obligatoria una evaluación exhaustiva del sitio. Las mediciones estacionarias a largo plazo se complementan con

simulaciones de dinámica de fluidos computacional, que son una herramienta de uso común para analizar y comprender el flujo de viento tridimensional sobre terreno complejo. Aunque bajo una intensa investigación, tales simulaciones aún muestran una alta sensibilidad a varios parámetros de entrada como el terreno, la atmósfera y la configuración numérica (p. 427).

Debido a la necesidad de realizar mediciones confiables en terrenos difíciles, que de forma ordinaria podrían realizarse con el uso de un mástil y un grupo de instrumentos para monitorear las condiciones eólicas, pero que en la aplicación práctica poseen debilidades, tal como lo mencionan Simma y colaboradores (2020) “Hay muchas opciones para medir la velocidad del viento local y la turbulencia, pero la mayoría son inamovibles, engorrosas o costosas”. (p.1); se ha visualizado la relevancia de múltiples investigaciones que han encauzado su interés en brindar opciones confiables en mediciones del viento sin el empleo de un mástil. Las investigaciones aportan ideas innovadoras o denominadas “pruebas de concepto (*proof of concept POC*)”, además, otras confrontan estudios previos para validar o refutar propuestas previamente ensayadas.

Sin embargo, de las múltiples investigaciones, el interés se centra en la experimentación y aplicación de tecnologías de tipo dron y globos inflados con helio en la elevación de instrumentos para la medición de la velocidad del viento.

En el caso de los estudios que han empleado drones con fines de medición de la velocidad y dirección del viento, Meier y colaboradores (2022), mencionan que es posible clasificar los estudios con base en dos situaciones características, la primera enfocada en la elevación de un instrumento de medición acoplado al dron y la segunda con el análisis de datos obtenidos de las respuestas automáticas del vuelo del dron:

Para estimar el viento, la comunidad de investigadores ha adoptado enfoques que se pueden clasificar en dos categorías: basados en sensores de flujo a bordo y basados en energía inercial más. En el primer enfoque, se monta un sensor de flujo directamente en el UAV (*Unmanned Aircraft Systems*) que permite la medición directa del flujo de aire, por ejemplo, con un tubo de Pitot o un anemómetro sónico. Sin embargo, los MUAV no son adecuados para este enfoque ya que sus hélices impactan fuertemente el flujo de aire alrededor del dron. En el último enfoque, solo se utilizan datos inerciales y de navegación para inferir las velocidades del viento. El UAV se considera como un sistema dinámico con una entrada: los comandos del

piloto automático; una salida: la posición y actitud del dron, y una perturbación externa: el viento. Por lo tanto, siempre que se conozcan u observen el modelo aerodinámico del dron, los comandos del piloto automático, la posición del dron y la actitud del dron, entonces se puede estimar el viento (p.1).

Prudden y colaboradores (2018), exponen en su investigación el análisis de las consideraciones y limitaciones de las diferentes configuraciones de SUAS (*Small Unmanned Aircraft Systems*) sistemas de aeronaves no tripuladas pequeñas, en particular los UAS multirrotor (MUAS) o los denominados drones, y sus capacidades cuando operan dentro de la capa límite atmosférica. Se analizaron varios métodos para medir los flujos fluctuantes de SUAS y se presentan los resultados preliminares de una plataforma de "anemómetro volador" con sonda de presión de orificios múltiples (MHPP) montada en un quadrotor. Los vuelos en un rango de altitudes demostraron que las mediciones *in situ* tanto de la velocidad media del viento como de la intensidad de la turbulencia desde una plataforma suspendida en el aire son factibles. Esto indica que MUAS se pueden utilizar como plataformas de detección de viento flexibles con buena resolución espacial alta. También se analizaron sugerencias sobre cómo los futuros desarrollos tecnológicos y operativos de SUAS pueden mejorar aún más las aplicaciones de ingeniería eólica.

Wolf y colaboradores (2017, Abril) identificaron modelos de anemómetros específicos que son buenos candidatos para montar en vehículos aéreos no tripulados y se investigó la viabilidad de utilizar la retroalimentación de los UAV (*unmanned aerial vehicles*) para determinar la velocidad y la dirección del viento. El sistema resultante, especialmente cuando se utiliza el anemómetro Rev.P (anemómetro térmico) de bajo costo, tiene el potencial de ser menos costoso y más fácil de usar en comparación con las tecnologías existentes de globos y torres meteorológicas.

Zheng-nong y colaboradores (2021) estudiaron la viabilidad de la medición del campo de viento de la capa límite con un dron de seis rotores equipado con un anemómetro y se analizaron las características del viento medidas, incluida la velocidad media del viento, la dirección del viento, la intensidad de la turbulencia, el factor de ráfaga, la longitud integral de la turbulencia y el espectro de potencia. Los resultados se compararon con los resultados medidos de anemómetros fijados en una torre eólica. Los resultados mostraron que los valores de velocidad y dirección del viento medido por el UAV son básicamente los mismos que los valores medidos en la torre eólica

después de la corrección, y el error entre los dos es de $\pm 3\%$. La precisión del perfil de viento ajustado por el UAV es alta. La rugosidad media del terreno calculada mediante el ajuste de datos es 0,148. Los diversos parámetros característicos del viento fluctuante medidos por el UAV están cerca de los valores medidos en la torre eólica, y el error entre los dos es de $\pm 5\%$. Existe una correlación exponencial entre la intensidad de la turbulencia y el factor de ráfaga. El espectro de energía eólica medido por el UAV es básicamente consistente con el medido en la torre eólica

Varentsov y colaboradores (2021), exponen en su estudio la consideración de la experiencia de usar dos métodos de bajo costo para el perfil de viento, que pueden aplicarse fácilmente en los estudios de campo con demandas modestas de oportunidades logísticas, infraestructura disponible y presupuesto. El primero es un método clásico y bien conocido de sondeo de globo piloto, es decir, cuando el globo se trata como una partícula lagrangiana y se rastrea mediante observaciones de coordenadas angulares del teodolito. El segundo se basó en un sondeo vertical con un popular y relativamente barato cuadricóptero DJI Phantom 4 Pro del mercado masivo y utiliza su oportunidad incorporada para restaurar el vector de viento desde los ángulos de inclinación del cuadricóptero. Ambos métodos demostraron un acuerdo razonable y aplicabilidad incluso en condiciones climáticas adversas y terreno complejo. Para la estimación del viento basada en drones, se muestra la importancia de la calibración en comparación con las observaciones de viento de alta calidad.

Vasiljević y colaboradores (2020), presentaron un sistema LiDAR de drones de prueba de concepto (*POC proof of concept*) y se muestran los resultados de varias campañas de prueba que validan su capacidad para medir la velocidad del viento con precisión. El sistema POC se basa en un LiDAR de onda continua (*CW continuous wave*) de doble telescopio, con telescopios a bordo de drones y optoelectrónica terrestre. Se emplearon unidades de drones y cardán disponibles comercialmente. Las campañas de demostración comenzaron con una serie de comparaciones de las mediciones de la velocidad del viento adquiridas por el sistema POC con mediciones simultáneas realizadas por sensores cercanos basados en mástiles. En promedio, se encontró una concordancia de aproximadamente $0,1 \text{ ms}^{-1}$ entre las mediciones de la velocidad del viento horizontal basadas en mástiles y drones. Posteriormente, se investigó el alcance de la perturbación del flujo causada por la corriente descendente del dron. Estas pruebas reivindicaron la elección un

tanto conservadora de los rangos de medición LiDAR para las comparaciones iniciales de la velocidad del viento. En general, los excelentes resultados obtenidos sin ninguna corrección de movimiento de drones y con un control de posición de drones bastante primitivo indican el potencial de los sistemas dron-LiDAR en términos de precisión y aplicaciones. Recomiendan que más allá de 60 msnm las mediciones convencionales de la velocidad del viento *in situ* requieren torres costosas. Cualquier medición basada en torre suele ser prohibitivamente costosa, especialmente en alta mar.

Sasaki y colaboradores (2021) en su estudio, realizaron mediciones de los perfiles verticales de las concentraciones de viento y aerosoles en altitudes de hasta 1000 m alrededor del monte Sakurajima, uno de los volcanes más activos de Japón, se midieron *in situ* con el empleo de un dron equipado con un anemómetro ultrasónico y un sensor de aerosol. Los perfiles de viento medidos por drones se compararon con datos Doppler LiDAR y valores de análisis derivados de un modelo meteorológico. Los perfiles verticales medidos por drones recopilados a una velocidad vertical de 1 ms⁻¹ (hacia arriba y hacia abajo) mostraron una fuerte concordancia con las observaciones LiDAR, al igual que los valores promedio de las mediciones de drones que sobrevolaron. El dron encontró una cizalladura vertical del viento evidente en las cercanías del monte Sakurajima. Se instaló un sensor de aerosol en el dron con la capacidad de medir partículas finas (PM_{2.5}) y gruesas (PM₁₀) simultáneamente; de esta manera, se pudieron distinguir cenizas volcánicas y aerosoles contaminantes alrededor del volcán. Así, se demostró que los drones podrían aplicarse para investigar las condiciones del viento y los aerosoles *in situ*, incluso en lugares peligrosos cerca de volcanes activos.

Ingenhorst y colaboradores (2021) midieron, en lugar de simular, las desviaciones de la velocidad del viento sobre un terreno complejo mediante el uso de un sistema de medición aerotransportado flexible. Un vehículo aéreo no tripulado fue equipado con un anemómetro ultrasónico estándar. La incertidumbre en el sistema se evaluó frente a los datos del anemómetro estacionario a diferentes alturas y mostró una muy buena concordancia, especialmente en la estimación de la velocidad media del viento (<0,12 ms⁻¹) y la dirección media (<2,4). Se realizó una medición de prueba sobre un sitio boscoso y montañoso para analizar la variabilidad espacial y temporal en la situación

del viento. Se detecta una diferencia dependiente de la posición en el aumento de la velocidad del viento de hasta un 30 % en comparación con un anemómetro estacionario.

Kishigakia y colaboradores (2021) estudiaron la velocidad del viento en posiciones altas, como torres de transmisión, con el uso de un dron y un inclinómetro, según los investigadores este método permitió una medición segura y fácil de la velocidad aproximada del viento en posiciones altas, ya que según la legislación de Japón, está prohibido realizar mediciones por una persona a velocidades superiores a 10 m/s por más de 10 minutos en las torres de transmisión o situaciones de gran altura que pongan en riesgo la integridad humana.

Rudiyanto y colaboradores (2020), investigaron los efectos que tiene las turbulencias generadas en el vuelo de un dron sobre el instrumento de medición instalado, centrándose en los datos de la velocidad del viento con una variedad de velocidades de rotación de la hélice del dron y los lugares de posición del anemómetro que rodean el dron. El uso de drones en esta investigación fue con el empleo de un prototipo de dron, que está equipado con un registrador de datos de anemómetro de hilo caliente. El tipo de registrador de datos de tarjeta de memoria de anemómetro de hilo caliente que se usó en esta investigación fue de tipo regular y se modificó para instalarlo en el dron. La investigación se centró en la búsqueda de una respuesta sobre qué tan grande es la desviación de los datos de velocidad del viento afectados por la turbulencia del viento de la hélice del dron.

Wetz y colaboradores (2021), estudiaron con el uso de una flota de vehículos aéreos no tripulados (UAV) cuadricopteros, un sistema para medir la distribución espacial del flujo de la capa límite atmosférica. La gran ventaja de este enfoque es que se pueden muestrear sincrónicamente puntos de medición múltiples y flexibles en el espacio. El algoritmo para obtener la dirección y la velocidad del viento horizontal está diseñado para las fases de vuelo estacionario y se basa en el principio de la resistencia aerodinámica y la dinámica de quadrotor relacionada. Se realizaron 76 vuelos de calibración y validación. La torre de 99 m equipada con anemómetros de copa y sónicos en el sitio se utilizó como referencia para la calibración de las mediciones de viento. La validación con un conjunto de datos independiente contra los anemómetros de torre revela que una precisión promedio de 0.3 ms^{-1} para la velocidad del viento y < 8 para la dirección del viento.

Otro tipo de investigaciones emplean la matemática para relacionar los datos obtenidos del vuelo de drones y con el uso de cálculos o formulas, estimar la velocidad del viento. La investigación

desarrollada por González-Rocha y colaboradores (2019) presenta tres enfoques para la estimación de la velocidad del viento basados en tres modelos de movimiento de quadrotor (cuadricoptero): un modelo de partículas cinemáticas, un modelo de partículas dinámicas y un modelo de cuerpo rígido. Para el modelo más simple, la partícula cinemática, la velocidad del viento se puede inferir directamente del triángulo del viento, siempre que el usuario haya caracterizado la relación entre el ángulo de inclinación y la velocidad del viento relativa en traslación constante. Este enfoque supone, sin embargo, que la aeronave se encuentra en un movimiento casi constante, manteniendo una condición de vuelo en equilibrio incluso con viento variable. El modelo de partículas dinámicas relaja un poco la suposición de movimiento casi constante, y el modelo de cuerpo rígido relaja aún más la restricción, esto captura los efectos transitorios y mejora potencialmente la estimación de la velocidad del viento.

Simma y colaboradores (2020) proponen en su investigación un método para medir la velocidad del viento con la utilización de los datos registrados por el piloto automático de un dron quadrotor. Las pruebas de empuje estático proporcionan los parámetros necesarios para calcular las estimaciones de viento. Las pruebas de vuelo se realizaron en un sitio de prueba con condiciones de viento laminar con el quadrotor flotando junto a un anemómetro ultrasónico 2D estático con velocidades del viento entre 0 y 5 m/s. Las estimaciones de viento horizontal logran resultados excepcionalmente buenos con valores de error cuadrático medio (RMSE) entre 0,26 y 0,29 m/s para la velocidad del viento, así como entre 4,1 y 4,9° para la dirección del viento.

Hattenberger y colaboradores (2022), estimaron el viento promedio que influye en un dron quadrotor solo con base a sensores de navegación estándar y ecuaciones de movimiento. Se puede utilizar en varias situaciones, incluidos los estudios atmosféricos, la planificación de trayectorias bajo restricciones ambientales o como referencia para estudiar vuelos en la capa de corte. Para ello se ha desarrollado un pequeño dron quadrotor con forma esférica. Los datos de vuelo se registran a partir de la telemetría durante las pruebas de vuelo en interiores y exteriores y se procesan posteriormente. La solución propuesta se basa en un procedimiento de calibración con optimización global para extraer el modelo de arrastre y un filtro de Kalman para la estimación en línea de la velocidad y dirección del viento. Finalmente, se demuestra una implementación a bordo de la estimación en tiempo real con vuelos reales en un ambiente interior controlado.

Por último, en el análisis de investigaciones desarrolladas para la medición de las características del viento con el uso de drones, se cuenta con trabajos que aplican técnicas sofisticadas denominadas “*machine learning*”, las cuales requieren de datos y algoritmos para predecir comportamientos de los equipos y con esto, establecer la velocidad y orientación del viento.

Crowe y colaboradores (2020), en su trabajo, evaluaron la precisión de la predicción de la velocidad del viento de dos algoritmos de aprendizaje automático (ML), entrenados con datos de actitud derivados de acelerómetros de alta frecuencia temporal de dos drones separados, en dos días de medición y validados con mediciones de viento registradas de un anemómetro sónico 3D cercano instalado en un mástil. Además de la estimación de la velocidad del viento, proporcionaron una primera aproximación a la caracterización de la turbulencia horizontal con la utilización de las variaciones de la velocidad del viento.

Zimmerman (2022), presenta en su investigación un observador de perturbaciones basado en aprendizaje automático “*machine learning*” (ML), que estima implícitamente el viento en función del estado del dron sin requerir un anemómetro dedicado. Los datos experimentales se recopilan al realizar el vuelo de un quadrotor instrumentado cerca de dos anemómetros de referencia. Se desarrollan cuatro modelos de ML: una red neuronal de memoria a corto y largo plazo (LSTM), una red neuronal artificial, una red neuronal de unidad recurrente cerrada (GRU) y una regresión de proceso gaussiana.

Para el caso particular del sistema elevado por medio globos inflados con helio, solo se cuenta con el estudio de Lyasota (2013), en el cual desarrolla un prototipo denominado “globo cautivo” anclado a la superficie por medio de una guía o cable, el instrumento que empleo fue el anemómetro ultrasónico. Se realizaron pruebas a 150 y 23 m.

Por lo expuesto con anterioridad, es posible fundamentar la presente investigación con la demostración de la factibilidad de medir la velocidad y dirección del viento con el uso de drones, y de forma experimental, o denominada “prueba de concepto” (POC *proof of concept*); realizar la misma caracterización del viento con el uso de globos inflados con helio para la elevación de los instrumentos de medición, ya que existe una sola referencia a este tipo de sistema de monitoreo y se requiere de mayores estudios con esta clase de tecnologías .

8 Objetivos

General

Analizar las ventajas y limitaciones de tecnologías sustitutivas en sistemas de monitoreo de potencial eólico por medio de la comparación en las mediciones de la velocidad, orientación y altura del viento en las instalaciones del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur ITUGS.

Específicos

1. Construir tres tipos de sistemas de monitoreo para la medición de potencial eólico en las instalaciones del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur.
2. Medir la velocidad y dirección del viento para establecer el potencial eólico con la utilización de tres sistemas de monitoreo diferentes.
3. Comparar los datos obtenidos con cada uno de los sistemas de monitoreo para la medición de potencial eólico planteados.

9 Hipótesis

Para la obtención de datos validos en la medición de potencial eólico, se requiere de la selección de una altura adecuada para la medición, reducir los efectos de turbulencia que provoca el viento durante la medición y continuidad en la medición.

10 Materiales y métodos

10.1 Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación planteada fue cuantitativa.

10.2 Método

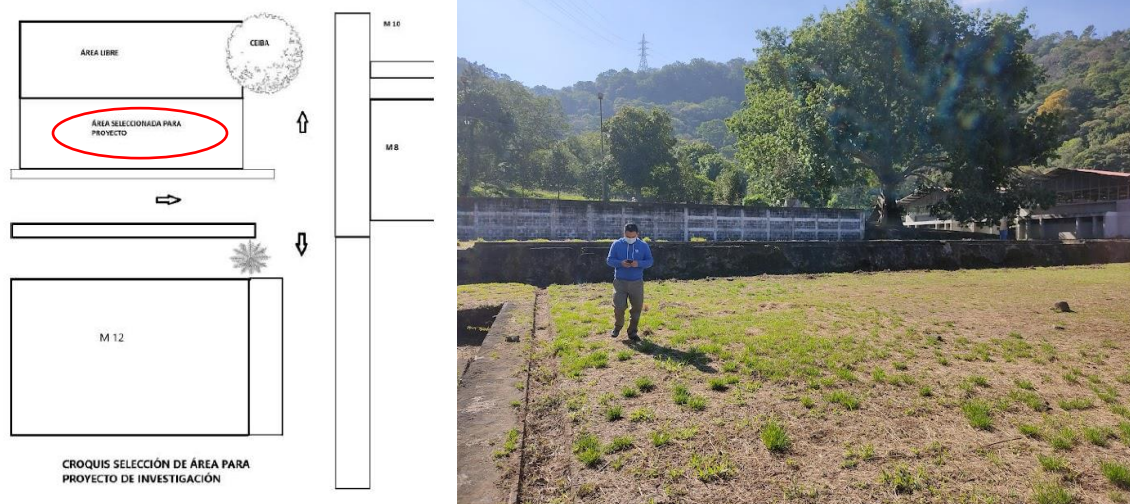
10.3 Área de estudio.

La investigación se desarrolló en las instalaciones del Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur ITUGS, ubicado en el km 45 de la antigua carretera a Palín, en el departamento de Escuintla, Guatemala. Dentro de las instalaciones del Instituto se seleccionó un área adecuada para la ejecución del proyecto (véase Figura 7). Las características del área seleccionada fueron la poca influencia de edificaciones cercanas, la poca o nula interferencia de vegetación (ambas condiciones para evitar la turbulencia en el viento) y la calidad de no interferir con otras actividades del instituto.

El área tiene coordenadas $14^{\circ} 22' 30''$ de latitud y $90^{\circ} 43' 24''$ para la longitud, además, una altura sobre el nivel del mar de 1 147 m. La información se obtuvo de Google Earth. Estos datos sirvieron como parámetros de la “estación de monitoreo”, que requiere el software WRPLOT para el desarrollo de las rosas de viento.

Figura 7.

Ubicación del área para el desarrollo de la investigación.



Nota: el área designada para el desarrollo de la investigación fue un espacio abierto frente al edificio M 12 del ITUGS. Elaboración propia.

10.4 Descripción de los métodos (como se recolectan los datos al final de cada explicación de los métodos)

Sistema de monitoreo por mástil

El primer sistema de monitoreo se construyó a partir de la integración de diversos materiales, que en conjunto se denominan sistema por mástil. Este sistema fue fabricado para ser desmontable y de fácil instalación, además, que su altura puede cambiarse con el acople o retiro de tubos en secuencia, con esto se lograron dos longitudes para la medición del viento a 10 y 15 m. En la fabricación se utilizaron dos tubos 3 pulgadas y tres tubos de 2 pulgadas de diámetro, roscados en sus extremos que se unieron con seis acoples roscados; el material de los tubos fue aluminio debido a que su peso es un tercio del peso que podría tenerse con los mismos tubos en material de acero, esto facilitó el proceso de instalación. Para la transición de los tubos de aluminio de distinto diámetro se empleó un conector tipo campana de 3 pulgadas a 2 pulgadas y accesorios roscados, en las uniones se utilizó cinta de teflón para garantizar un apriete seguro y evitar la corrosión en las roscas. La elaboración del mástil se desarrolló bajo techo para luego ser instalado en el área seleccionada del estudio (véase Figura 8).

Figura 8.

Proceso de fabricación del mástil



Nota: a la izquierda, detalle del reductor tipo campana, al centro, ensamble de los tubos, acoples y base del mástil, a la derecha prueba de equilibrio de la base y tubos roscados. Elaboración propia.

La base del mástil se fabricó con una placa de acero de 30 cm de lado y 1.5 cm de espesor, se le soldó un acople tipo niple roscado de 3 pulgadas al centro de la placa, para integrar los tubos (véase Figura). A la placa se le perforaron 6 agujeros que sirvieron para su instalación en el área establecida. A distancias de 6 y 9 m de la base del mástil, se colocaron cables de acero de 3/16 de pulgada de grosor y longitud de 10 y 14 m, alrededor de los tubos ensamblados. El apriete del cable se logró con cuatro mordazas por tensor, se instalaron tres tensores para la prueba de 10 m y seis tensores para la prueba de 15 m (véase Figura 9).

Figura 9.

Accesorios para unión del mástil.



Nota: a la izquierda, instalación del mástil en el sitio designado del Instituto, al centro, base de soporte para el mástil, a la derecha, elementos de sujeción por cable de acero y reductor de tubería roscado. Elaboración propia.

La instalación del mástil se llevó a cabo en el área designada, para esto se colocaron 6 pernos de expansión para concreto, que sirvieron como mecanismos de sujeción para la placa (base del mástil), además, dos argollas de expansión para concreto y una barra de anclaje fabricada con acero de construcción de ½ pulgada, a 4.2 m de distancia de la base del mástil, cada punto de anclaje sirvió para la instalación de los tensores y se distanciaron 120° entre cada uno (véase Figura 10). La instalación solo requirió de herramienta para perforación de concreto y 8 personas para elevar el mástil.

Figura 10.

Instalación del mástil



Nota: a la izquierda, instalación de pernos de expansión, al centro, montaje del mástil, a la derecha, mástil montado. Elaboración propia

En el extremo del sistema, se instaló el equipo de monitoreo PCE FWS 20N, el cual cuenta con anemómetro de cazoletas, veleta para medición de dirección del viento, medidor de precipitación y termómetro. El rango para la medición de la velocidad del viento es de 0 a 50 m/s, con una resolución de 0.1 m/s y precisiones de ± 1 m/s para velocidades menores a 5 m/s y $\pm 10\%$ para velocidades mayores a 5 m/s. Para la recepción y almacenamiento de las mediciones de los distintos sensores del equipo, se contó con una pantalla digital tipo *data logger*, misma que se ubicó en un recipiente plástico hermético a una distancia de 1.5 m de la base del mástil, ambos equipos utilizan baterías AA para su funcionamiento (2 para el equipo de monitoreo y 3 para el *data logger*). La transmisión de la información para estos equipos es por medio de señal inalámbrica (véase Figura 11).

Figura 11.

Anemómetro PCE FWS 20 N



Nota: a la izquierda, instalación de equipo FWS 20N en extremo del mástil y pantalla *data logger*, al centro, resguardo del *data logger* en el mástil con recipiente hermético, a la derecha muestra cercana del instrumento FWS 20N con anemómetro de cazoletas, veleta, higrómetro y termómetro. Elaboración propia.

Sistema por dron.

El segundo sistema desarrollado para la investigación se basó en la integración de tres elementos, un dron a control remoto marca DJI modelo Mavic 3, una base de perfil de aluminio para la instalación del anemómetro, la cual fue acoplada al dron por medio de cinchos plásticos, y un anemómetro tipo cazoletas PCE ADL 11, mismo que fue acoplado a la base de aluminio por medio de un tornillo. La base de aluminio tiene forma de “L” con dimensiones de 10 por 12 cm. El anemómetro cuenta con las siguientes características, rango de 1.2 a 30.0 m/s, resolución 0.01 m/s y precisión de $\pm 3\% + 0.20$ m/s. La selección de los materiales e instrumento se debieron al tamaño y peso de los mismos, ya que esto facilitó la elevación del dron sin restricciones de vuelo. La ubicación del instrumento se determinó con base a pruebas de vuelo y se logró establecer que el mejor sitio era la parte frontal superior del dron, en esta ubicación se encuentra menos desequilibrio para la aeronave, ya que en la parte trasera se encuentra la batería, además, de reducir los efectos del viento vertical producto del funcionamiento de las hélices sobre el instrumento (véase Figura 12).

Figura 12.

Sistema por dron



Nota: a la izquierda, dron DJI Mavic 3, al centro, anemómetro PCE ADL 11, a la derecha, sistema ensamblado para monitoreo. Elaboración propia.

Sistema por globos inflados con helio.

El tercer sistema desarrollado consistió en la unión de varios elementos poliméricos, se emplearon ocho globos de látex, de 90 cm de diámetro inflados con helio, sujetos con trozos de hilo de nylon a una línea de anclaje común. El hilo de nylon empleado fue de 1 mm, los acoples se realizaron por medio de nudos ordinarios, se emplearon dos tramos de hilo uno de 10 m de los globos hacia el anemómetro y otro de 10 o 15 m, según la necesidad de medición, del anemómetro hacia el punto de anclaje en el suelo. Para la medición de la velocidad del viento con este sistema se empleó un anemómetro PCE A420 de tipo cazoletas, el cual fue sujetado a la línea de anclaje de nylon por medio de una estructura de alambre de acero galvanizado, diseñada específicamente para la movilidad adecuada del instrumento en todo momento de funcionamiento, además, de permitir la verticalidad del anemómetro en independencia de la elevación de los globos (véase Figura 13). El instrumento cuenta con las siguientes características, rango de 0.9 a 35.0 m/s, resolución 0.1 m/s y precisión de $\pm 2\% + 0.2$ m/s. El anclaje en el suelo se realizó con un trozo de acero de construcción de $\frac{1}{2}$ pulgada.

Figura 13.

Sistema por globos inflados con helio

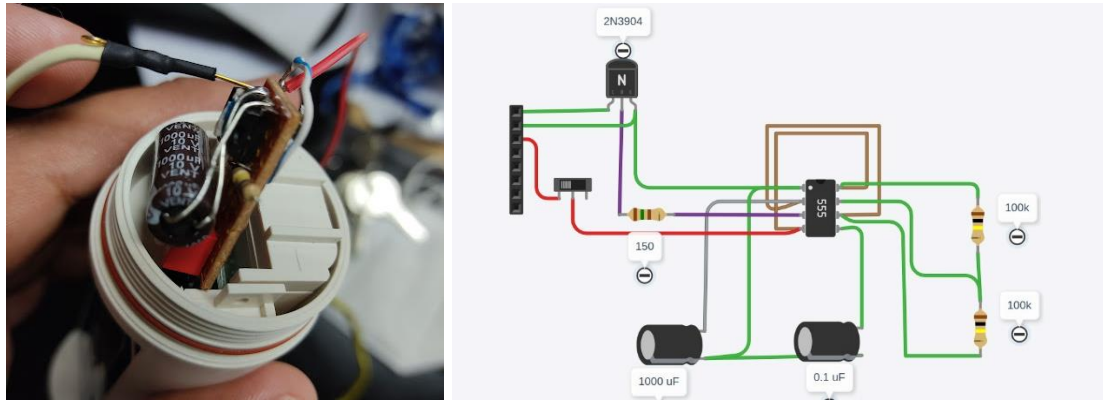


Nota: a la izquierda, anemómetro PCE A420 con armazón de acero galvanizado, al centro y derecha pruebas de monitoreo con el empleo de globos inflados con helio. Elaboración propia.

Debido a que el anemómetro A420 no puede utilizarse de forma automática en vuelo para la captura de datos, ya que requiere de la pulsación de varios botones de forma manual, se decidió automatizar el mismo. Con el uso de un circuito electrónico desarrollado con componentes discretos y un circuito integrado 555, se logró automatizar el instrumento para que capturará datos con una frecuencia de 4 minutos (véase Figura 14).

Figura 14.

Circuito electrónico para automatización de anemómetro A420



Nota: A la izquierda tarjeta física insertada en el instrumento, a la derecha, diagrama de conexión y descripción de componentes discretos. Elaboración propia.

10.5 Recolección de información

Los monitoreos del viento con los distintos sistemas se desarrollaron con base a la frecuencia de captura de información, la altura a la que se realizó la medición, las comparaciones entre los sistemas de tipo dron con el mástil y del tipo globo inflado con helio con el mástil, para ambas comparaciones se consideró la dirección del viento igual a la información obtenida del sistema tipo mástil. Las variables que se midieron fueron la velocidad y dirección del viento a alturas de 10 y 15 m.

Las pruebas de comparación del sistema de dron y mástil se llevaron a cabo los días 5, 7, 8, 9 y 19 de septiembre y los días 6, 7, 21, 26 y 27 de octubre, en horarios de 11 y 14 horas, la prueba duro 25 minutos cada una. Para las pruebas de comparación de los sistemas de mástil y globo, se desarrollaron los días 7 y 9 de septiembre, y 21, 26 y 27 de octubre, en horarios de 11 a 16 hrs.

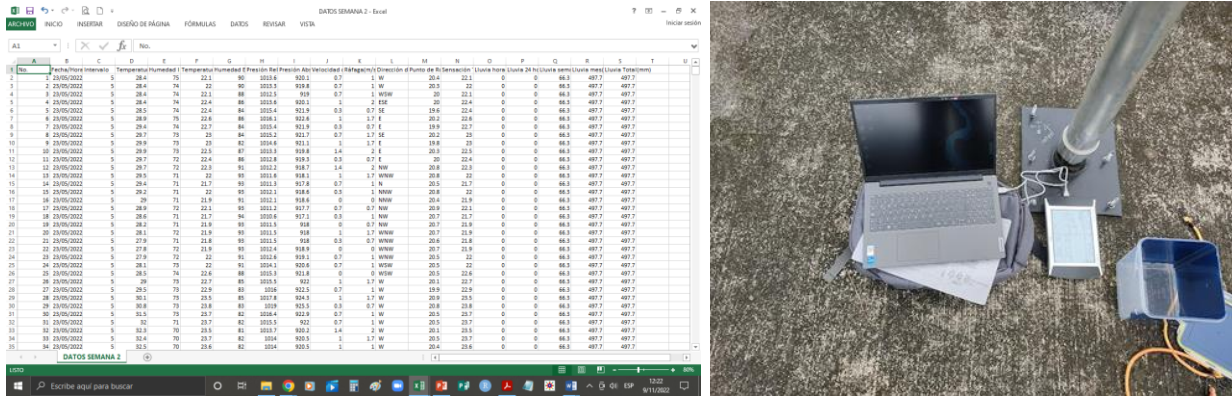
La obtención de la información fue diferente para cada sistema. En el sistema de tipo mástil se utilizó la pantalla propia del instrumento (*data logger*), la cual puede conectarse por medio de un cable USB a una computadora, tanto para obtener la información guardada como para programar la frecuencia de la captura de datos. En este sistema se programó una frecuencia de 5 min (véase Figura 15).

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Figura 15.

Ejemplo de los datos obtenidos con el sistema de monitoreo tipo mástil.

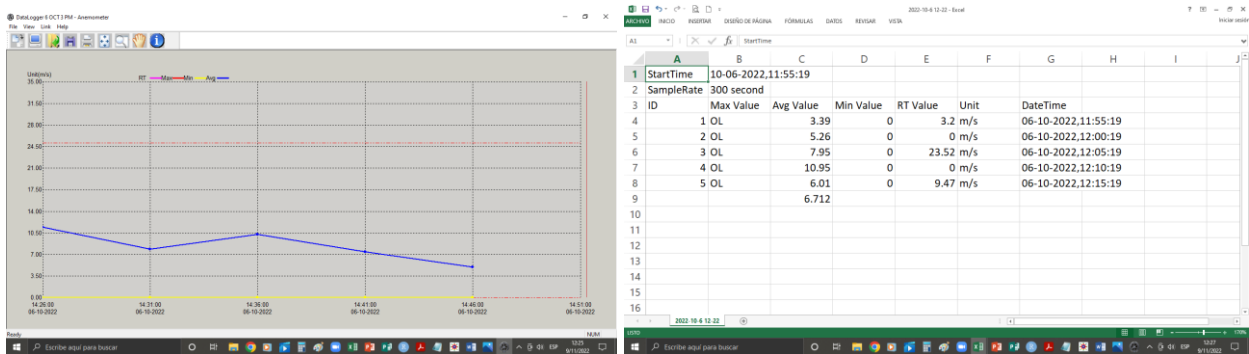


Nota: a la izquierda datos obtenidos con el anemómetro PCE FWS 20N en formato MS Excel, a la derecha, conexión del *data logger* a la computadora. Elaboración propia.

Para el sistema por dron, se utilizó el software propio del instrumento PCE ADL 11 y el conector USB que trae incorporado el anemómetro. Se programaron para cada prueba una frecuencia de 5 min (véase Figura 16). El tiempo límite de vuelo para el dron fue de 25 min, debido a la necesidad de recarga de la batería.

Figura 16.

Ejemplo de los datos obtenidos con el sistema de monitoreo tipo dron.



Nota: a la derecha, gráfica producto del manejo de los datos obtenidos con el anemómetro PCE ADL 11, a la derecha, mismos datos en formato MS Excel. Elaboración propia.

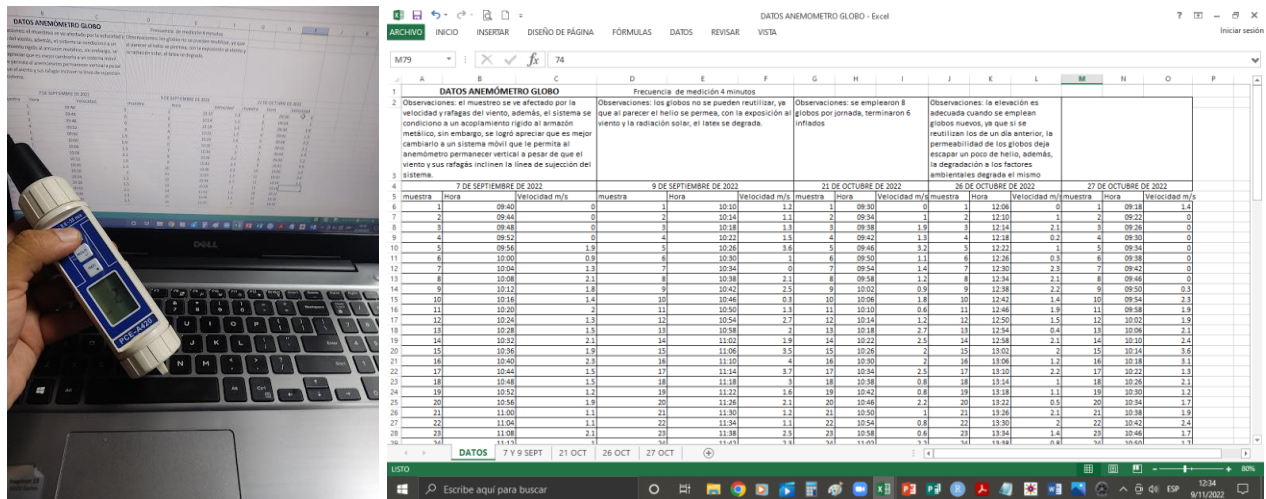
Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Con el sistema por globos inflados con helio, el instrumento PCE A420, guardo las capturas de los datos obtenidos con la frecuencia programada de 4 min, luego después de finalizar la jornada de monitoreo se leen directamente del instrumento los datos guardados en la memoria interna (véase Figura 17). El sistema tiene una memoria máxima de 100 datos.

Figura 17.

Ejemplo de los datos obtenidos del sistema elevado con globos.



Nota: para la obtención de los datos el anemómetro A420 posee tres botones que sirven para desplazarse a través de la memoria interna y en una pantalla LCD, leer directamente los datos capturados, estos se trasladan a una hoja electrónica en formato MS Excel para su procesamiento e interpretación. Elaboración propia.

Por la naturaleza de la investigación, no se requirió opinión favorable de un comité de bioética, licencias o permisos de instituciones del estado.

10.6 Procesamiento y análisis de la información

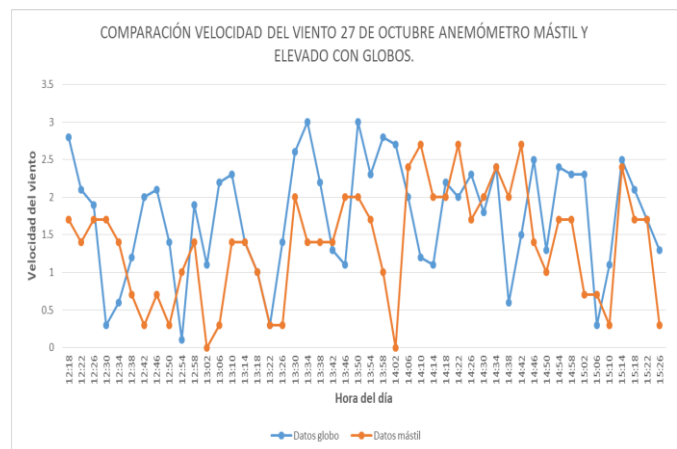
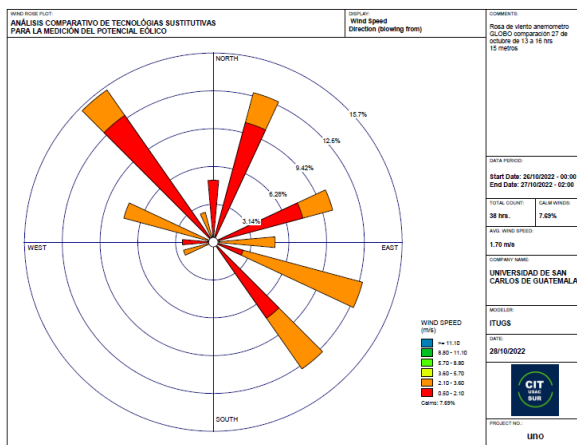
Con los datos obtenidos de cada uno de los sistemas de monitoreo se realizaron comparaciones con el uso de pruebas estadísticas de diferencia de medias y representaciones gráficas.

Las pruebas estadísticas de diferencia de medias se realizaron con las herramientas de análisis de datos de MS Excel. Se hicieron pruebas de estadístico “t” de student para la información obtenida en las comparaciones de las mediciones del dron y el mástil, ya que son menores a 30 datos, y pruebas de estadístico “z” para la información obtenida en las comparaciones de las mediciones del mástil con el sistema de globos inflados con helio, ya que son mayores a 30; se utilizó un alfa de 0.05 en ambos casos. La hipótesis nula que se manejo fue que las medias de ambos sistemas son iguales, y como hipótesis alterna que las medias de ambos sistemas no son iguales.

También se emplearon representaciones gráficas, con el uso de gráfica de líneas y el uso de rosas de viento, las cuales fueron elaboradas con MS Excel y WRPLOT (Griensven, 2018) respectivamente (véase Figuras 18).

Figura 18.

Ejemplo de representaciones gráficas para comparaciones.



Nota: a la derecha representación tipo Rosa de Vientos, obtenida con el software WRPLOT (Griensven 2018), a la izquierda representación tipo gráfica de líneas, obtenida con MS Excel. Elaboración propia.

Debido a que todas las direcciones de los monitoreos se consideraron con la información obtenida del instrumento instalado en el mástil, se requirió de una conversión (véase Tabla 1) de los datos debido a que la información recuperada del anemómetro FWS 20N, solo se presenta en notación cardinal, y el software WRPLOT acepta únicamente la notación en grados.

Tabla 1.

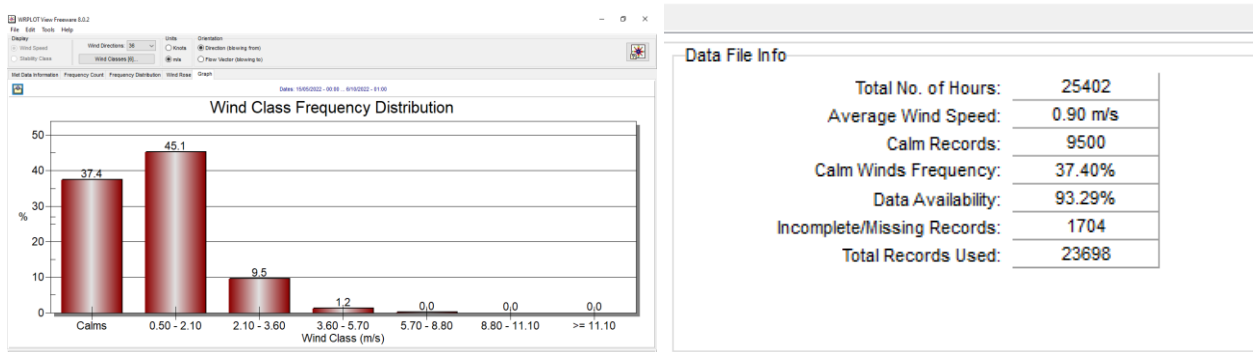
Equivalencias grado-orientación cardinal

Grados	Orientación cardinal	Grados	Orientación cardinal
0	N	180	S
22.5	NNE	202.5	SSW
45	NE	225	SW
67.5	ENE	247.5	WSW
90	E	270	W
112.5	ESE	292.5	WNW
135	SE	315	NW
157.5	SSE	337.5	NNW

Nota: interpretación norte N, este E, oeste W y sur S, la combinación entre las orientaciones cardinales da como resultado las demás direcciones. Elaboración propia.

Figura 19.

Ejemplo de representación de la información con WRPLOT.



Nota: el software WRPLOT puede ordenar la información y dar resúmenes de los datos cargados no solo para la elaboración de las rosas de viento sino un detalle completo del tratamiento de los datos; en la imagen de la izquierda se aprecia la distribución de Weibull y la derecha la información resumida con el dato de la velocidad promedio. Tomada de (Griensven 2018).

11 Resultados y discusión

11.1 Resultados

11.1.1 Sistema por mástil y sistema por dron

Desde el 5 de septiembre hasta el 7 de octubre, las mediciones se realizaron a una altura de 10 m, del 21 al 26 de octubre a una altura de 15 metros.

De las pruebas estadísticas de diferencia de medias se puede observar que existe igualdad en el 68.75 % de las comparaciones (véase Tabla 2).

En las Figuras 21 y 22, es posible apreciar la presencia de dos conjuntos de datos graficados con líneas de colores distintos, esto con la finalidad de observar de mejor forma la variabilidad o similitud entre los dos sistemas de medición en un lapso de tiempo igual.

Con la comparación en las gráficas lineales, es posible establecer que existieron diferencias de los datos recuperados con el sistema tipo dron respecto al sistema del mástil, cabe la posibilidad que esto se haya debido a diversos factores como, vibraciones inducidas por el funcionamiento ordinario del dron que repercutieron en la sensibilidad del anemómetro ADL 11, el hecho de comparar dos tipos de instrumentos distintos, es decir uno de modelo ADL 11 (montado en el dron) y otro de modelo FWS 20N (instalado en el mástil), la presencia de turbulencia vertical producto del giro de las hélices del dron y el error propio del instrumento durante la captura de datos. Sin embargo, las muestras de información recuperadas los días 9 de septiembre a las 13 horas (Figura 21) y 26 de octubre a las 11 horas (Figura 22), presentan una buena similitud, casi idéntica en las mediciones.

Debido a que el monitoreo eólico se enriquece en términos de calidad de la información recolectada, con el uso de rosas de viento, en la Figura 23 se muestran algunos ejemplos de las rosas obtenidas con la integración de la velocidad y dirección del viento. Como referencia de orientación se consideraron los valores de los datos obtenidos del instrumento FWS 20N en los días y horarios requeridos para cada comparación.

Con el uso de las equivalencias de la Tabla 1, se ajustó la información en el formato aceptado por el software WRPLOT. Las imágenes son producto del procesamiento de los datos cargados en el programa de computación.

Como se aprecia en la Figura 23 con los datos obtenidos el día 26 de octubre a las 11 hrs, se establece la similitud en los resultados de las mediciones, ya que en las rosas se observa una magnitud representada por el mismo color producto de los datos obtenidos en ambos instrumentos, en contraste con los datos obtenidos el día 9 de septiembre a las 11 hrs, donde se observa que los datos recuperados del instrumento montado en el dron, son más grandes en magnitud y en la rosa se representan en colores diferentes a los datos recuperados del instrumento instalado en el mástil. Aunque en ambas situaciones se mantiene la misma dirección. Por último, de las comparaciones más interesantes se observan las rosas producto de los datos del día 7 de septiembre a las 14 hrs, donde se muestra que existe tanto diferencia en la magnitud como en la dirección de los datos. Esto se debió a que el instrumento instalado en el mástil, registró valor cero para la velocidad del viento al momento que el instrumento montado en el dron, sí registró información de velocidad diferente a cero para la dirección del viento recuperada por el instrumento del mástil.

Figura 20.

Gráficas lineales datos mástil-dron septiembre



Elaboración propia a partir de los datos recuperados de los dos sistemas de monitoreo.

Figura 21.

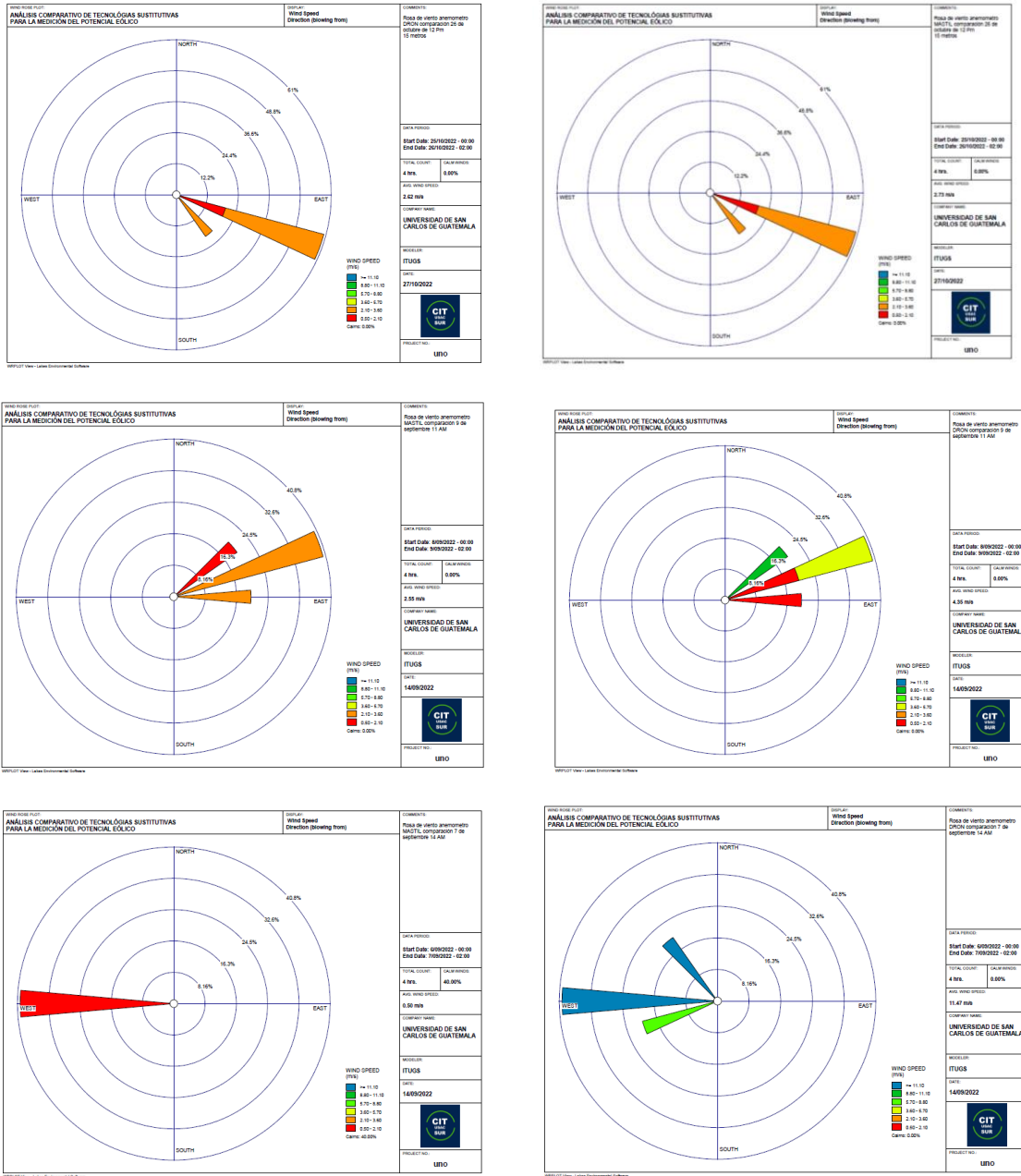
Gráficas lineales datos mástil-dron octubre



Elaboración propia a partir de los datos recuperados de los dos sistemas de monitoreo.

Figura 22.

Rosas de viento mástil-dron



Nota: imágenes de la derecha anemómetro instalado en el mástil, izquierda anemómetro montado en el dron. Parte superior 26 de octubre, parte media 9 de septiembre, parte baja 7 de septiembre. Elaboración propia a partir de datos procesados en WRPLOT.

En estas imágenes (Figura 23) se observa otra forma para conocer la similitud o diferencia de los resultados en las jornadas de monitoreo. Con esto se puede ratificar que sí existieron diferencias en varias mediciones durante los meses de monitoreo.

Para un detalle más amplio sobre las rosas de viento resultantes de las jornadas de monitoreo restantes, véase el apéndice uno.

11.1.2 Sistema por mástil y sistema elevado por globos inflados con helio.

Las mediciones con el sistema elevado por globos inflados con helio, se vieron limitadas por la alta presencia de lluvia, producto de las condiciones climáticas que prevalecieron en el país durante el segundo semestre del año.

De las comparaciones de medias se puede reportar una similitud estadística del 40 % de los monitoreos (véase Tabla 2).

En las imágenes de las Figuras 24 y 25, se observan las variaciones entre ambos sistemas, mucho de esto se debe a las debilidades del sistema elevado por globos inflados con helio, ya que en los monitoreos realizados existió influencia del viento de forma directa sobre la posición de los globos, lo que provocó durante periodos de presencia de ráfagas de viento o la existencia de fuerzas, provocadas por el empuje del viento mayores a la capacidad de sustentación del sistema, que el anemómetro descendiera de la altura de medición y de esta forma los datos obtenidos por el anemómetro acoplado a los globos, muestren valores fuera del marco de referencia que es el instrumento fijo en el mástil.

Como complemento a la información descrita en las comparaciones de gráficos lineales, se tiene en la Figura 26 las rosas de viento para algunos días de monitoreo con el sistema elevado por globos. A diferencia de las representaciones de este tipo con el sistema montado en el dron, acá se contó con más datos por jornada de medición. Esto facilita la interpretación de los datos, ya que es posible observar cambios aparentes en el comportamiento de la información. Como se aprecia en las rosas del día 27 de octubre, los cambios en magnitud de la velocidad proyectados no difieren en gran medida.

En oposición con lo representado en la rosa del día 21 de octubre donde es posible observar cambios tanto en magnitud como dirección del viento.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Tabla 2.

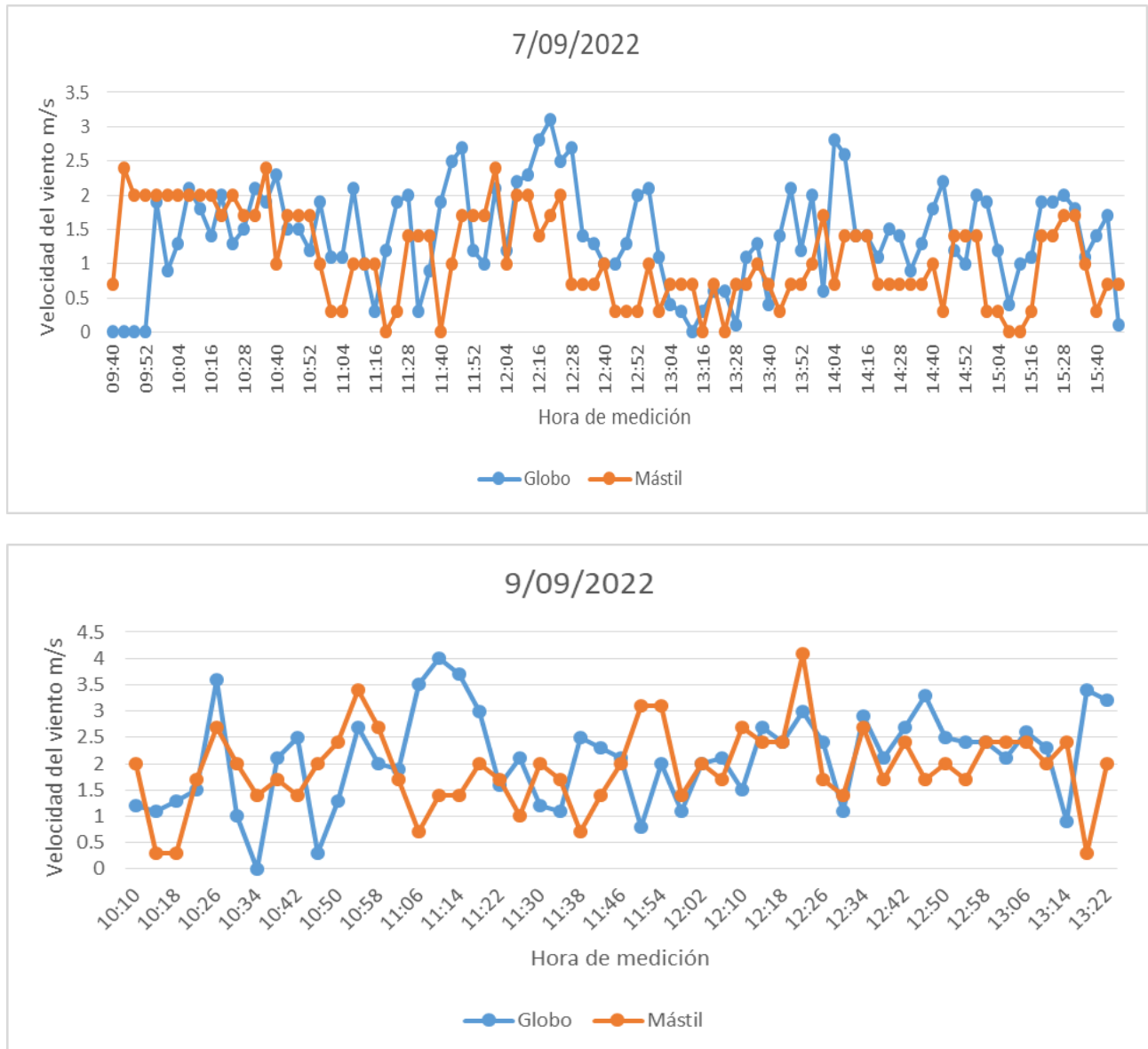
Resumen de las pruebas de diferencia entre medias.

Muestra	Fecha	Hora	Medias		Resultado
			Dron	Mástil	Prueba de diferencia entre medias
1	5/09/2022	14 hrs	2.2	2.946	Son estadísticamente iguales las medias.
2	7/09/2022	11 hrs	1.97	1.96	Son estadísticamente iguales las medias.
3	7/09/2022	14 hrs	9.732	0.46	No son estadísticamente iguales las medias
4	8/09/2022	11 hrs	2.526	1.9	Son estadísticamente iguales las medias.
5	8/09/2022	15 hrs	5.842	1.24	Son estadísticamente iguales las medias.
6	9/09/2022	11 hrs	4.03	2.55	Son estadísticamente iguales las medias.
7	9/09/2022	14 hrs	2.442	2.18	Son estadísticamente iguales las medias.
8	19/09/2022	11 hrs	14.36	0.66	No son estadísticamente iguales las medias
9	6/10/2022	11 hrs	6.712	2.1	No son estadísticamente iguales las medias
10	6/10/2022	14 hrs	8.334	1.04	No son estadísticamente iguales las medias
11	7/10/2022	11 hrs	1.97	1.28	Son estadísticamente iguales las medias.
12	21/10/2022	11 hrs	1.662	1.72	Son estadísticamente iguales las medias.
13	21/10/2022	14 hrs	6.656	0.14	Son estadísticamente iguales las medias.
14	26/10/2022	11 hrs	2.492	2.58	Son estadísticamente iguales las medias.
15	26/10/2022	15 hrs	7.564	0.62	Son estadísticamente iguales las medias.
16	27/10/2022	11 hrs	4.106	2.04	No son estadísticamente iguales las medias
Análisis		El 68.75% de las pruebas son estadísticamente iguales			
	Fecha	Hora	Globo	Mástil	Prueba de diferencia entre medias
1	7/09/2022	de 9 a 15 hrs	1.3726	1.0935	No son estadísticamente iguales las medias
2	9/09/2022	de 10 a 13 hrs	2.1122	1.9142	Son estadísticamente iguales las medias.
3	21/10/2022	de 13 a 16 hrs	0.6594	0.6428	Son estadísticamente iguales las medias.
4	26/10/2022	de 12 a 16 hrs	1.1113	0.8585	No son estadísticamente iguales las medias
5	27/10/2022	de 12 a 16 hrs	1.75	1.377	No son estadísticamente iguales las medias
Análisis		El 40 % de las pruebas son estadísticamente iguales			

Nota: información obtenida a partir de las pruebas de comparación entre medias de cada jornada de monitoreo. Elaboración propia.

Figura 23.

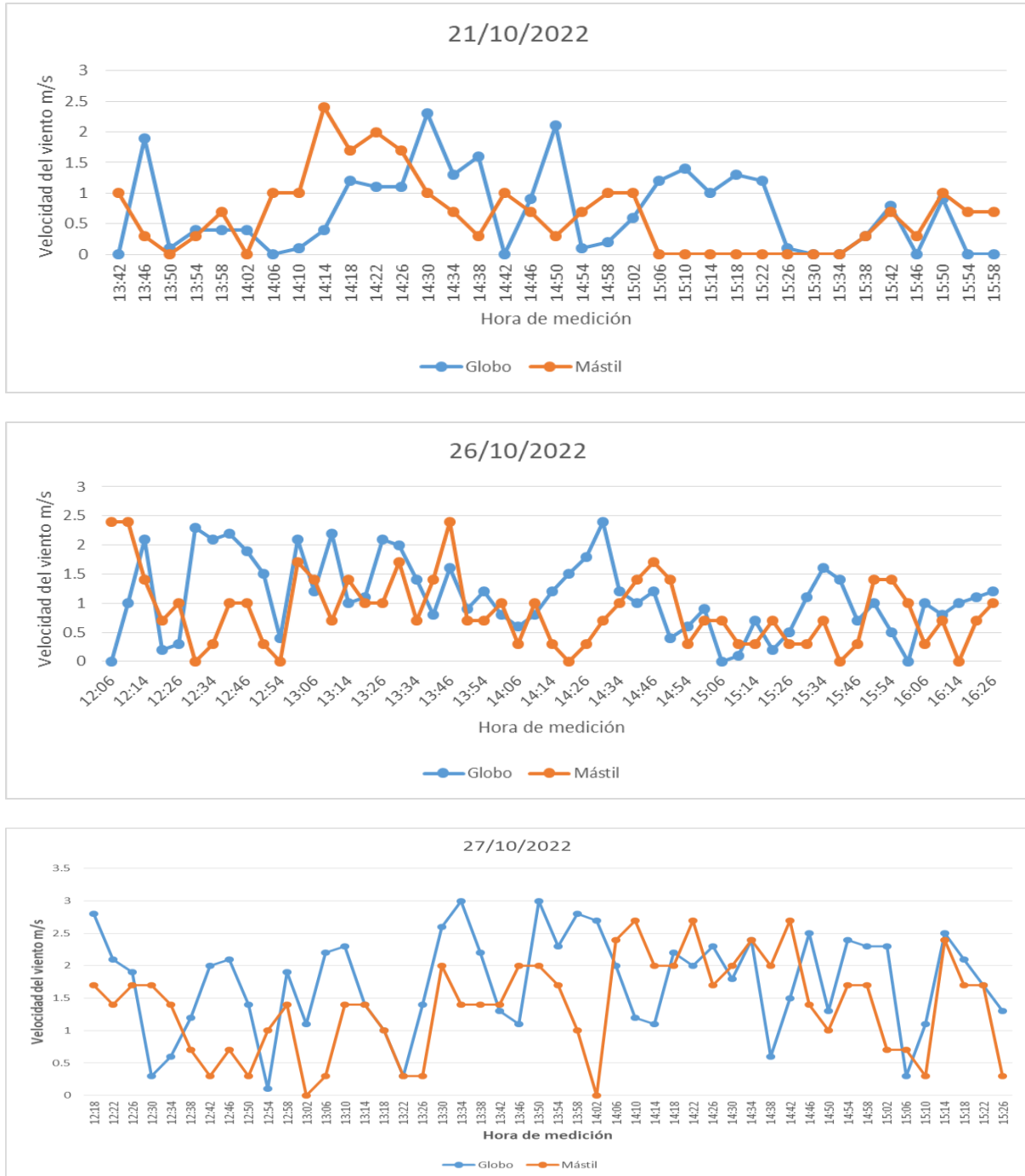
Graficas lineales mástil-globo septiembre



Elaboración propia a partir de los datos recuperados de ambos sistemas.

Figura 24.

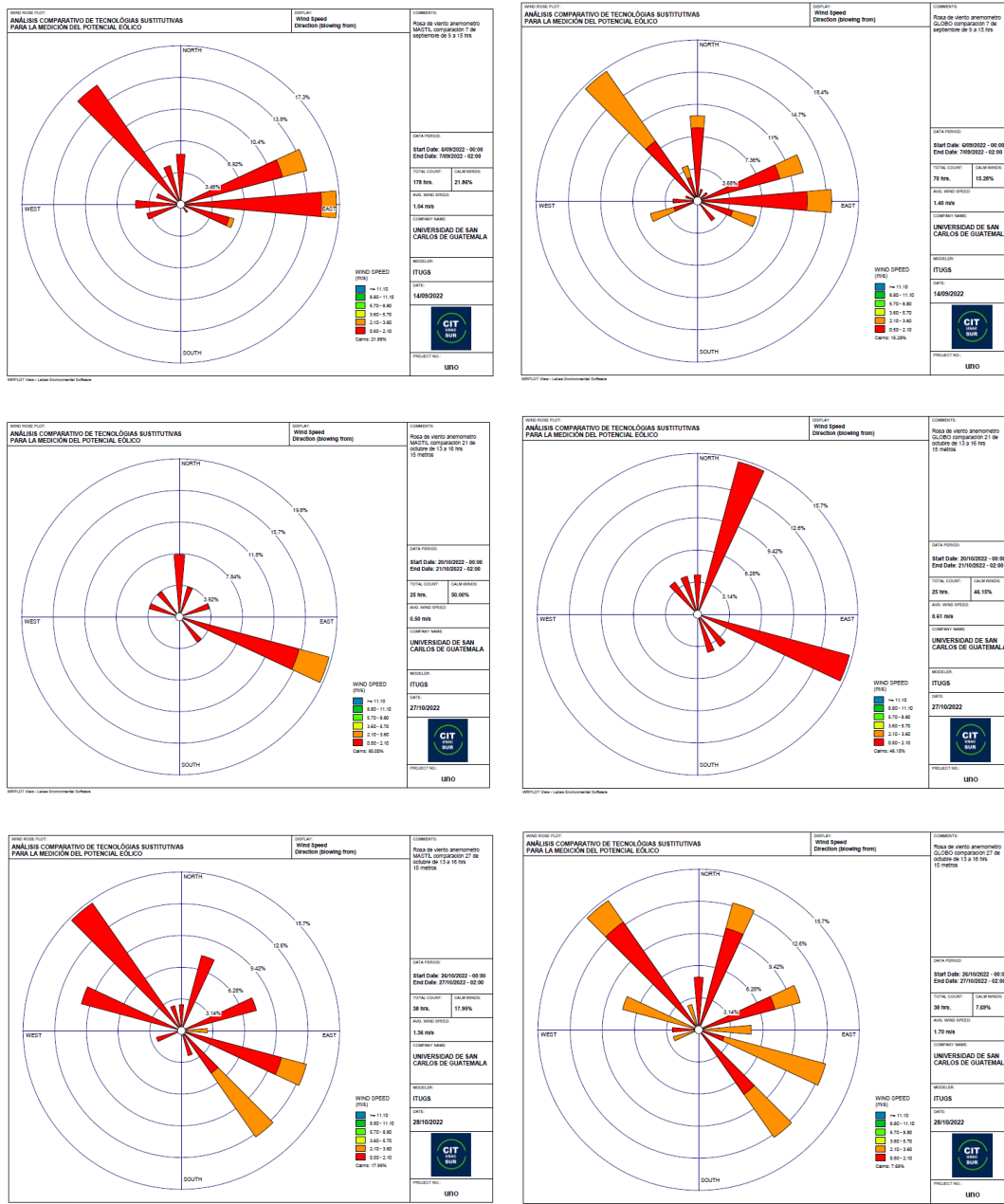
Graficas lineales mástil-globo octubre



Elaboración propia a partir de los datos recuperados de ambos sistemas.

Figura 25.

Rosas de viento mástil-globo



Nota: imágenes de la derecha anemómetro instalado en el mástil, izquierda anemómetro elevado con globos. Parte superior 7 de septiembre, parte media 21 de octubre, parte baja 27 de octubre. Elaboración propia a partir de datos procesados en WRPLOT.

11.1.3 Análisis comparativo de las cualidades de los sistemas

Para la realización del análisis comparativo se consideraron los valores de velocidad, dirección y altura, obtenidos de tres diferentes sistemas. Sin embargo, es necesario también exponer las distintas ventajas y limitaciones entre cada sistema. En la Tabla 3 se encuentra una descripción que resume las principales diferencias y similitudes entre los sistemas investigados.

Tabla 3.

Ventajas y limitaciones de cada sistema de monitoreo

Sistema de medición	Medición por mástil	Medición por elevación con globos inflados con helio	Medición por elevación con dron
Comparación			
Aplicación en monitoreo eólico	El sistema de monitoreo por mástil tiene la ventaja, una vez instalado, de no requerir mayor control o cuidado; la captura de los datos puede realizarse cada semana o mes de buena forma (según el modelo de anemómetro empleado en el sistema). Por esta razón se emplea como la mejor opción para el monitoreo eólico.	Este sistema puede emplearse de buena forma en sitios costeros donde la temperatura es elevada (esto reduce la probabilidad de contracción del gas helio dentro de los globos) y existen pocas limitaciones en objetos que puedan atascar la línea de anclaje.	El sistema con dron puede utilizarse sin necesidad de un sitio específico de anclaje, pero requiere de una energización continua para monitoreo eólico, esto puede solventarse en cierta medida, con el uso de más baterías o más drones para una misma jornada de medición, de esta forma se reducen los tiempos muertos.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

<p>Mediciones</p>	<p>Solo pueden realizarse en una altura y sitio específico. Las mediciones son confiables en valores obtenidos.</p>	<p>Puede moverse fácilmente, cambiar la altura y sitio de la medición. Las mediciones pueden diferir de los datos reales ya que el empuje de los globos se ve afectado por ráfagas de viento horizontal.</p>	<p>No son posibles mediciones continuas, debido al tiempo de vuelo útil de la batería del dron.</p>
<p>Cambios en el diseño planteado</p>	<p>Se inició el proyecto con la propuesta de tubería de acero para el mástil, sin embargo se estimó que el peso total de la estructura sería demasiado para la instalación y traslado de los materiales al sitio seleccionado de monitoreo, por lo que se decidió utilizar tubería de aluminio y de esta forma reducir el peso en casi dos tercios.</p>	<p>Se había proyectado elevar el anemómetro con un solo globo inflado con helio, pero debido a la posibilidad de explosión del globo y su vida útil durante una jornada de medición, se determinó que la opción más adecuada era emplear más globos de menor tamaño. Esto redujo los problemas de explosión en el aire, ya que se puede recuperar de forma más simple un globo de varios disponibles, además, los globos ensayados de látex, cumplen de buena forma una jornada completa de medición</p>	<p>Al inicio se planteó la idea de montar el anemómetro PCE A420 sobre un dron, pero al realizar las pruebas de intento de vuelo, se logró determinar que el dron no podía elevar el anemómetro antes mencionado, por lo que se decidió cambiar el modelo de anemómetro por uno PCE ADL 11, el cual pesa dos tercios menos que el A420. Este anemómetro si logro elevarse con el uso del dron DJI Mavic 3.</p>

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

		de 8 horas.	
Aplicaciones diversas	Es limitado ya que requiere de una base para la instalación y sitios de anclaje para cables tensores.	Mediciones de la velocidad del viento con un cambio de altura rápido. Esto debido a que solo se requiere de una línea de anclaje más larga para darle mayor elevación al instrumento.	Aplicaciones de medición de velocidad del viento en sitios de difícil acceso, sobre el mar o lagos, también, muy cerca de infraestructuras.
Altura de medición	10 y 15 metros, no se realizaron pruebas a mayor altura de armado, ya que requiere de un armado mayor para alcanzar más altura.	10 y 15 metros, puede lograrse más siempre que el área de medición esté libre de objetos, donde pueda atascarse la línea de soporte anclada al suelo.	10 y 15 metros, puede lograrse más, siempre que no se supere el alcance del control remoto del dron y se respeten las rutas aéreas.
Instalación	El mástil se puede armar con materiales no convencionales (aluminio), esto reduce el peso del traslado del mástil al sitio de instalación. De forma ordinaria se emplea acero galvanizado o estructuras armadas en acero. Se necesita de una base sólida y sitios	Se requiere de una línea anclada al suelo, un anclaje y espacio abierto para movimientos en todas direcciones.	No se requiere de alguna instalación específica, pero si requiere de un sitio libre de rutas aéreas para las mediciones de velocidad del viento.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

	de anclaje para cables tensores.		
Problemas con el entorno y el clima	La transmisión de datos se ve afectada por la alta humedad ambiental, con el equipo ensayado (anemómetro PCE FWS 20N), en algunos días de medición con mucha lluvia durante el día, no se logró recuperar datos.	<p>Los globos inflados con helio son susceptibles a las temperaturas menores a 23 °C, ya que a baja temperatura los gases se contraen, lo que provoca una pérdida en la capacidad de elevación del anemómetro.</p> <p>Los efectos del empuje del viento horizontal, provoca que los globos bajen su nivel de elevación, por lo tanto, el anemómetro baja su altura de medición y algunas mediciones no son válidas durante la toma de datos.</p>	<p>El dron no puede emplearse con alta concentración de humedad y presencia de lluvia, debido a la naturaleza de los componentes electrónicos que lo constituyen.</p> <p>Ráfagas muy fuertes de viento pueden desviar la ubicación del dron, respecto al sitio de medición, de igual forma esto resta tiempo de vuelo útil durante la medición.</p> <p>La presencia de aves que vuelan cerca del sitio de medición, puede provocar colisiones accidentales y daños tanto para la fauna como para el dron.</p>
Dificultades técnicas	Perdida de datos en algunos días de medición por falta de buena conectividad	El anemómetro ensayado PCE A420, solo permite lectura de datos de forma manual,	El dron ensayado (DJI Mavic 3) tiene una autonomía de vuelo de 25 minutos con la

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

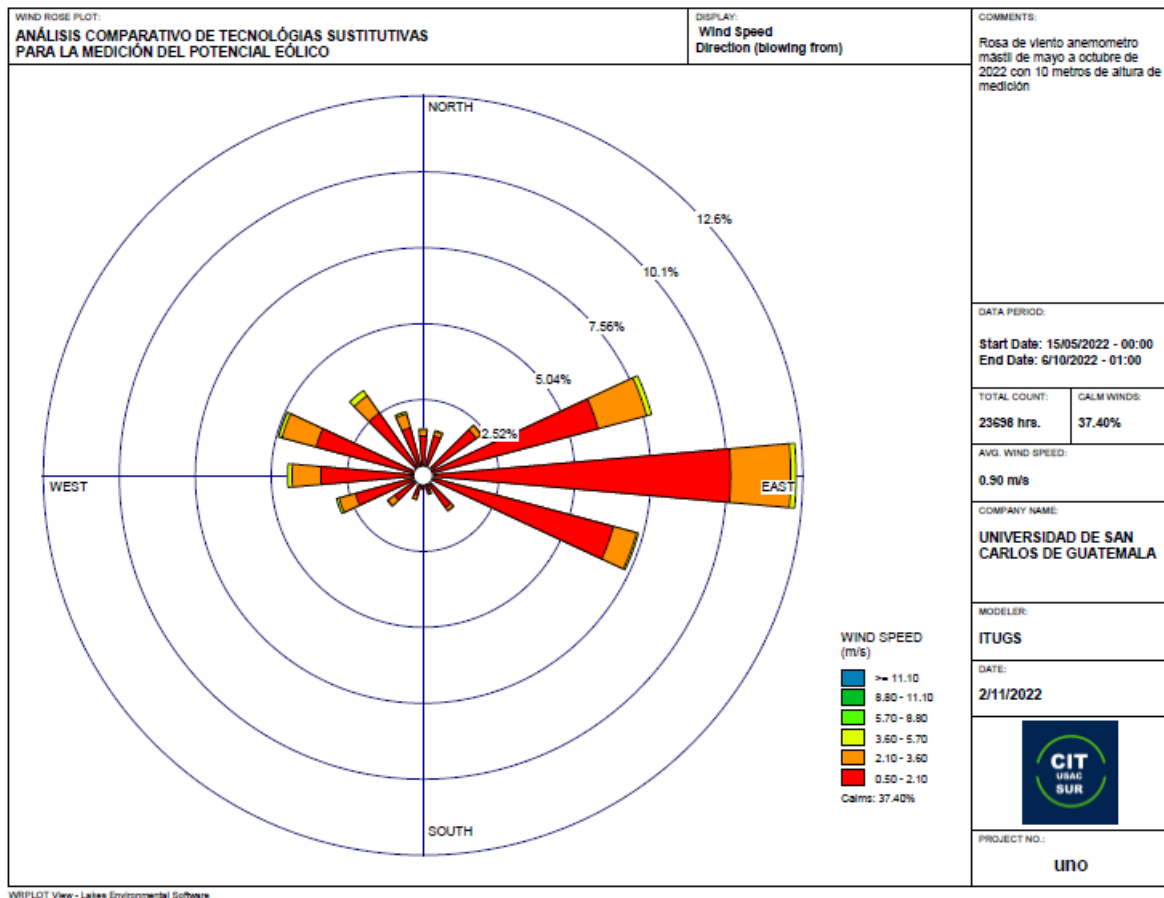
	entre el Logger y la computadora.	es decir se requiere leer directamente de la pantalla del instrumento, para obtener información. Este anemómetro también fue automatizado para la captura de los datos durante la jornada de medición ya que ordinariamente era manual para la captura de datos.	batería totalmente cargada, luego requiere de 80 minutos para recarga. No fue posible comprobar la energización desde tierra del equipo debido a que la batería del dron es “inteligente”, esto provoca que mientras se carga no puede usarse en vuelo, además, la línea de carga puede provocar que se atore en las aspas de las hélices y también provocaría lastre durante el vuelo, lo que reduciría la vida útil de los motores del dron.
Costos aproximados de los sistemas ensayados	Q 11 200.00	Q 5 800.00	Q 26 000.00

11.1.4 Potencial eólico del sitio investigado.

Debido a que el potencial eólico requiere de un tiempo prolongado para ser un dato aceptado en un sitio en particular, se muestran los resultados de las mediciones con el uso del anemómetro instalado en el mástil y se descartan los datos obtenidos con los otros sistemas ensayados, ya que carecen de una continuidad en la medición. En la figura 26 se observa la Rosa de Viento producto del monitoreo de seis meses (mayo a octubre) a una altura de 10 metros.

Figura 26.

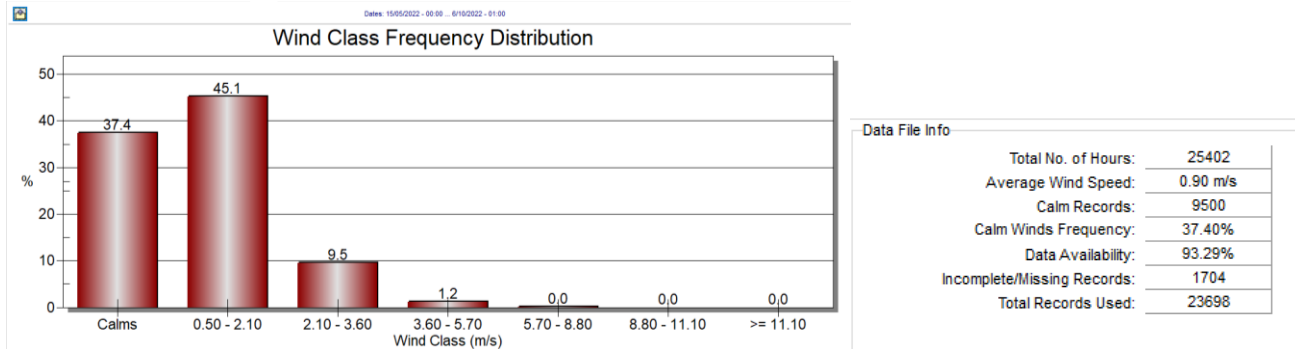
Rosa de viento monitoreo en mástil



Nota: Rosa de Viento producto del monitoreo durante 6 meses con el instrumento instalado en el mástil. Elaboración propia con el uso del software WRPLOT.

Figura 27.

Distribución de los datos obtenidos del instrumento instalado en el mástil



Nota: a la derecha distribución de Weibull producto de 6 meses de monitoreo con el instrumento montado en el mástil, a la izquierda resumen de la información ingresada al software WRPLOT.

Con los datos procesados por el software WRPLOT, velocidad promedio del viento de 0.90 m/s, y una densidad del aire estándar de 1.29 kg/m³, se utilizó la fórmula para el cálculo del potencial eólico y se obtuvo:

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3$$

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} (1.29) 0.90^3$$

$$\frac{P_d}{A} = 0.94041 \frac{W}{m^2} \text{ o } 0.00094041 \frac{kW}{m^2}$$

11.2 Discusión de resultados

De los sistemas de monitoreo ensayados en esta investigación se logró observar diferencias y similitudes con otras investigaciones desarrolladas por otros autores.

El sistema de monitoreo con el uso de drones y comparación con instrumentos montado en mástiles han sido estudiados por Chong y colaboradores (2020), Crowe y colaboradores (2020) y González-Rocha y colaboradores (2019), donde emplearon la comparación de las mediciones con un mástil a 10 metros de altura. Por su parte Simma y colaboradores (2020), realizaron comparaciones con un

mástil de 3 metros de altura y Vasiljević y colaboradores (2020), desarrollaron su estudio con la comparación a 18, 31, 44, 57 y 70 metros de altura; Wetz y colaboradores (2021) compararon información con mediciones a 50 y 90 metros; y Varentsov y colaboradores (2021) realizaron la comparación a 15 metros. A partir de la información consultada se logró establecer que, a pesar que en el presente estudio se realizaron mediciones a 10 metros, las cuales podrían compararse con otros estudios a la misma altura, existen diferencias. Lo primero es que en las investigaciones previas, no existen desarrollos experimentales en la misma ubicación geográfica (Chong y colaboradores (2020) en Corea del Sur y Crowe y colaboradores (2020) en Estados Unidos), en el mismo año y con la misma duración de monitoreo. Esto es relevante, ya que según lo expuesto por González-Rocha y colaboradores (2019) “la variabilidad de los datos obtenidos del viento depende también de la ubicación geográfica y las condiciones del terreno” (p. 2); lo segundo es que los investigadores que compararon los datos obtenidos con el montaje de instrumentos sobre drones, no emplearon el mismo modelo de dron o anemómetro, además que las tecnologías de los instrumentos difieren.

Como otra fuente de diferencia cabe mencionar la falta de estudios previos a nivel nacional que hayan experimentado con este tipo de análisis de tecnologías en el monitoreo del viento.

En el caso de los estudios que emplearon instrumentos acoplados o montados en la aeronave es posible mencionar que Zheng-nong y colaboradores (2021), Sasaki y colaboradores (2021), Wearmouth (2022). Ingenhorst y colaboradores (2021), Wolf y colaboradores (2017), Chong y colaboradores (2020) utilizaron anemómetros sónicos; Hattenberger y colaboradores (2022) y Rudiyanto y colaboradores (2020), emplearon un anemómetro de hilo caliente y Vasiljević y colaboradores (2020) realizaron su experimentación con el uso de radares LiDAR. Por lo que, a pesar que deberían ser mediciones similares, las tecnologías empleadas en los instrumentos influyen de forma directa en las mediciones, y debido a que en el presente estudio se buscó que las mediciones de potencial eólico fueran lo más cercanas posibles a las solicitudes reales de estos estudios, se requirió el empleo de un anemómetro de cazoletas.

El único registró que se ubicó sobre el uso de anemómetros de cazoletas montados en aeronaves, fue por parte de Riddell (2014), sin embargo, en su estudio empleo un helicóptero a control remoto para las mediciones y no un dron como tal.

Según Prudden y colaboradores (2018), la instalación de anemómetros de cazoletas es dificultosa en aeronaves no tripuladas, debido a la interferencia de los efectos dinámicos de sus piezas móviles. A pesar de esto, los resultados de la investigación demuestran la factibilidad de instalar un anemómetro de cazoletas lo suficientemente liviano (PCE ADL 11) en un dron comercial (DJI Mavic 3) y también la posibilidad de obtener datos de velocidad del viento aceptables. Cabe la posibilidad de seguir con el desarrollo de futuros proyectos que involucren estos dispositivos acoplados y obtener la ubicación adecuada del instrumento, además, de valores aceptables de medición de la velocidad del viento, durante la utilización del dron en vuelo.

Otro factor de relevancia es el tiempo de vuelo para cada muestreo. Como menciona Avanzini y colaboradores (2016), las aeronaves de este tipo, pueden llegar a volar con mayor tiempo si se logran avances en el almacenamiento de energía. Prudden y colaboradores (2018) realizaron mediciones con una duración de entre 12 y 15 minutos, Ingenhorst y colaboradores (2021) con 25 minutos, Meier y colaboradores (2022) con 3 minutos, Crowe y colaboradores (2020) con 13 minutos, Zimmerman (2022) 10 minutos, Wetz y colaboradores (2021) 17 minutos y Chong y colaboradores (2020) 20 minutos. Con base en estos resultados, se puede afirmar que el tiempo de vuelo de los drones para monitoreo del viento es limitado a un promedio de 15 minutos, de forma independiente del modelo de aeronave y tecnología empleada.

Al respecto también Mulgaonkar y colaboradores (2014) describe que los tiempos promedio de vuelo efectivo de este tipo de tecnologías, es de 15 a 20 minutos y los resultados del presente estudio alcanzaron los 25 minutos de vuelo efectivo, por lo que el tiempo logrado con el uso del dron DJI Mavic 3 es aceptable. Sin embargo, para fines de medición de potencial eólico, el tiempo de vuelo no es suficiente, por lo que se podría continuar con más estudios referentes al desarrollo de baterías de alta duración para estos fines o buscar alternativas para elevar los instrumentos de forma continua, como el empleo de varios drones en una jornada de medición o la búsqueda de la recarga eléctrica en vuelo de la aeronave.

En el caso del manejo de los resultados y su representación, autores como Varentsov y colaboradores (2021), Wolf y colaboradores (2017), Simma y colaboradores (2020), Vasiljević y colaboradores (2020), Hattenberger y colaboradores (2022), Ingenhorst et al (2021), Meier y colaboradores (2022), Rudiyanto y colaboradores (2020), Zimmerman (2022) emplearon gráficas lineales para comparar los

datos obtenidos de las mediciones obtenidas con el uso de drones y los datos de mástiles fijos. La diferencia con la forma en que se representaron los datos obtenidos en el estudio, fue la frecuencia de datos, ya que la mayoría de estudios consultados manejaron frecuencias de segundos, mientras que en la presente investigación se utilizó una frecuencia de 5 minutos para el caso de las comparaciones con el sistema montado con el dron y 4 minutos para la comparación con el sistema elevado por medio de globos inflados con helio. Las investigaciones más cercanas fueron la de Crowe y colaboradores (2020), que manejó una frecuencia de 2 y 5 minutos en sus gráficas, además, el estudio de Wetz y colaboradores (2021), con una frecuencia de un minuto.

González-Rocha y colaboradores (2019) empleó tanto gráficas lineales como Rosas de viento para la comparación de los resultados, aunque el autor no menciona el tipo de software para el tratamiento de los datos.

Con base en lo expuesto, se estableció que el manejo de los datos en la presente investigación, fue adecuado en la forma de comparar los resultados en los diversos sistemas.

Por último en la comparación de los sistemas de medición del viento elevados por medio de globos, a pesar que González-Rocha y colaboradores (2019), Wolf y colaboradores (2017), Sasaki y colaboradores (2021) y Riddell (2014), mencionan que el sistema de monitoreo con el empleo de globos es convencional y caro, solo se reportan dos estudios que desarrollaron el tipo de comparación que se ha alcanzado en la investigación que se presenta.

Varentsov y colaboradores (2021), generaron un estudio con el uso de un globo meteorológico para la elevación de instrumentos de medición de las condiciones del viento, sin embargo, no lo anclaron al suelo, lo dejaron ir como un globo ordinario de meteorología y se rastrearon los resultados por medio de GPS.

Lyasota (2013), por su parte desarrolló un prototipo de monitoreo eólico con el uso de un anemómetro ultrasónico instalado en la línea de anclaje de un globo cautivo al suelo, el cual fue elevado a 150 y 23 m. Con esto, comparó los datos obtenidos de un anemómetro de cazoletas instalado en una turbina eólica cercana y el anemómetro instalado en la línea del globo cautivo. Las diferencias de las medias de las velocidades del viento reportadas, para dos jornadas de monitoreo fueron de 3,5 m/s y 2,5 m/s, en el caso del tiempo de muestreo fue de minutos por cada jornada.

Al comparar los datos obtenidos con las medias de cinco jornadas obtenidas en el presente estudio, se obtuvieron diferencias de 0.28, 0.20, 0.01, 0.26 y 0.38 m/s, con la consideración que las pruebas se realizaron a alturas de 10 y 15 m, con jornadas de medición de 3 a 6 horas y una frecuencia de muestreo de 4 min. Se pudo establecer que influye de forma directa el uso de instrumentos similares y jornadas de tiempo más amplias, con la finalidad de obtener más datos representativos.

Para finalizar se puede concluir con lo siguiente: el sistema de monitoreo por mástil se ratifica como el sistema más recomendable para los fines de medición del potencial eólico en un sitio en particular, esto se debe a la confiabilidad de la información recolectada y la capacidad del sistema de continuar con las mediciones en tiempos adecuados, el sistema de monitoreo por globos elevados con helio, tiene el potencial para ser explorado con mayor detenimiento e interés, ya que las ventajas muestran posibles aplicaciones para la medición de la velocidad del viento de forma rápida y simple, durante una jornada aceptable, siempre que las condiciones climáticas y del sitio a monitorear lo permitan, el sistema de monitoreo con el uso del dron, es el más estudiado como solución opcional para la medición de la velocidad del viento, pero carece de la continuidad en su energización y aplicación específica, por lo que el desarrollo de este tipo de aeronaves para medición de la velocidad del viento y el rendimiento en vuelo de la misma, deben continuar como interés en futuras investigaciones.

Es posible fabricar un mástil cilíndrico para estudios experimentales, con el uso de materiales poco convencionales, ya que se utilizó aluminio como opción al acero que se usa con frecuencia para esta infraestructura; aunque requiere de mayores pruebas y estudios propios, el acoplamiento de un anemómetro de cazoletas con un dron fue aceptable, sin embargo, aún vale la pena seguir con ensayos similares para validar o descartar la certeza de los datos obtenidos con este sistema, por último, se valida la hipótesis planteada, ya que para la obtención de datos válidos en la medición de potencial eólico, sí se requiere de la selección de una altura adecuada para la medición, reducir los efectos de turbulencia que provoca el viento durante la medición y continuidad en la medición.

12 Referencias

- Avanzini, G., de Angelis, E.L., Giulietti, F., (2016). Optimal performance and sizing of a battery-powered aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 59, 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.10.015>
- Boveri, A. B., & ABB, S. (2012). *Cuaderno de aplicaciones técnicas n. 12 Plantas eólicas*. ABB.
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons.
- Chong, J., Lee, S., Shin, S., Hwang, S. E., Lee, Y., & Kim, S. (2020). Research on Meteorological Technology Development Using Rotary Multicopter Unmanned Aerial Vehicles and Its Application. In *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. *IEEE*, 540-544. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9214037>
- Crowe, D., Pamula, R., Cheung, H. Y., & De Wekker, S. F. (2020). Two supervised machine learning approaches for wind velocity estimation using multi-rotor copter attitude measurements. *Sensors*, 20(19), 5638.
- Cuco Pardillos, S. (2017). Manual de energía eólica. Desarrollo de proyectos e instalaciones. Colección Manual de referencia.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., & Kadner, S. (2011). *Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 242.
- Escudero J. (2004). *Manual de energía eólica*. Ediciones Mundi-Prensa
- González-Rocha, J., Woolsey, C. A., Sultan, C., & De Wekker, S. F. (2019). Sensing wind from quadrotor motion. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 42(4), 836-852.
- Griensven J., Thé C., Johnson M., Shatalov O. & Smotrikov V. (2018). WRPLOT View (version 8.0.2.) [Software]. Lakes environmental software. <https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/>
- Hattenberger, G., Bronz, M., & Condomines, J. P. (2022). Estimating wind using a quadrotor. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 14, <https://doi.org/10.1177/17568293211070824>

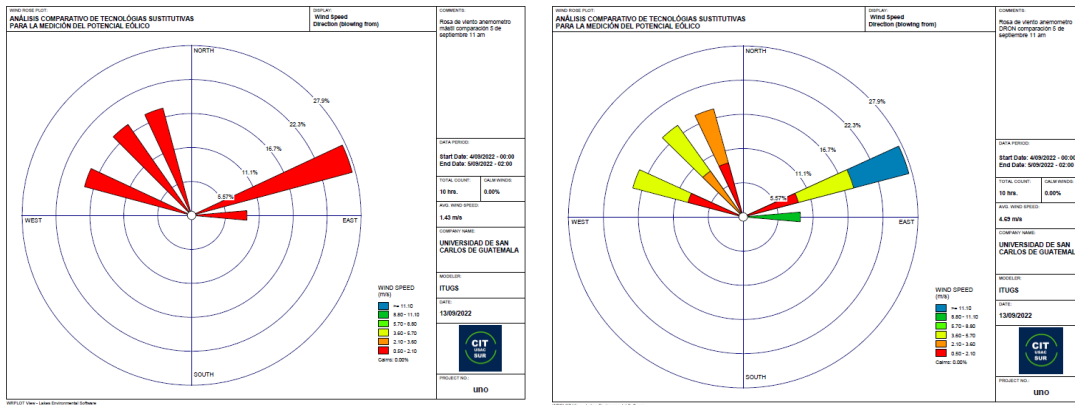
- Ingenhorst, C., Jacobs, G., Stöbel, L., Schelenz, R., & Juretzki, B. (2021). Method for airborne measurement of the spatial wind speed distribution above complex terrain. *Wind Energy Science*, 6(2), 427-440.
- Ishugah, T. F., Li, Y., Wang, R. Z., & Kiplagat, J. K. (2014). Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 37, 613-626.
- Kishigakia, N., Ijichia, H., Yoshino, K., & Tatsuokaa, T. (2021). Study on a Wind Velocity Measurement Method at High Positions with Drones. *Proceedings of the 8th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2021. The Institute of Industrial Applications Engineers, Japan*. 92-96. <https://doi.org/10.12792/icisip2021.017>
- López, M. V. (2012). *Ingeniería de la energía eólica (Vol. 5)*. Marcombo.
- Lyasota, A. (2013). *Sistema de medición de las características del viento en altura a base de globo cautivo* [Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/2099.1/17353>
- Marcial A. (2019). *Energía eólica y solar*. UD2 Energía eólica: ingeniería. Editorial Elearning, S.L.
- Meier, K., Hann, R., Skaloud, J., & Garreau, A. (2022). Wind Estimation with Multirotor UAVs. *Atmosphere*, 13(4), 551.
- Mur-Amada, J. (2001). *Master europeo en energías renovables y eficiencia energética: Curso de energía eólica*. Universidad de Zaragoza.
- Moro Vallina, M. (2013). *Tecnología industrial I*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Mulgaonkar, Y., y colaboradores, (2014). Power and weight considerations in small, agile quadrotors. In: SPIE Defense + Security. Baltimore, Maryland, United States. Available at: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2051112>
- Prudden, S., Fisher, A., Marino, M., Mohamed, A., Watkins, S., & Wild, G. (2018). Measuring wind with small unmanned aircraft systems. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 176, 197-210.

- Rudiyanto, B., Hariono, B., & Budiprasojo, A. (2020). Quadcopter Surveyor Drone Wind Velocity Data Characteristic for Optimal Hotwire Sensor Position. *Proceedings of Journal of Physics: Conference Series*, 1569(3), 032096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/3/032096>.
- Riddell, K. D. A. (2014). *Design, testing and demonstration of a small unmanned aircraft system (SUAS) and payload for measuring wind speed and particulate matter in the atmospheric boundary layer*. (Publication Number: AAT 1569498) [Master's Thesis, University of Lethbridge]. ProQuest Dissertations & Theses.
- Romero, L. (2017). *Gestión del montaje de parques eólicos*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Samela, A. M., Bahamonde, P. J., Naguil, J. L., Ñañez, E. R., Sanchez, H. R., Bonfili, O. J., ... & García, D. J. (2010, Noviembre 29). *Caracterización del régimen de vientos en la Ciudad de Río Gallegos* [Presentación de Conferencia]. II Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica. <https://rdu.iaa.edu.ar/handle/123456789/1910>
- Sasaki, K., Inoue, M., Shimura, T., & Iguchi, M. (2021). In Situ, Rotor-Based Drone measurement of wind vector and aerosol concentration in volcanic areas. *Atmosphere*, 12(3), 376. <https://doi.org/10.3390/atmos12030376>.
- Simma, M., Mjøen, H., & Boström, T. (2020). Measuring wind speed using the internal stabilization system of a quadrotor drone. *Drones*, 4(2), 23. <https://doi.org/10.3390/drones4020023>.
- Varentsov, M., Stepanenko, V., Repina, I., Artamonov, A., Bogomolov, V., Kuksova, N., ... & Varentsov, A. (2021). Balloons and quadcopters: Intercomparison of two low-cost wind profiling methods. *Atmosphere*, 12(3), 380. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos12030380>.
- Talayero Navales, A. P., & Telmo Martínez, E. (Eds.). (2011). *Energía eólica (Serie Energías renovables)*. Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Vasiljević, N., Harris, M., Tegmeier Pedersen, A., Rolighed Thorsen, G., Pitter, M., Harris, J., ... & Courtney, M. (2020). Wind sensing with drone-mounted wind LiDARs: proof of concept. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(2), 521-536. <https://doi.org/10.5194/amt-13-521-2020>.

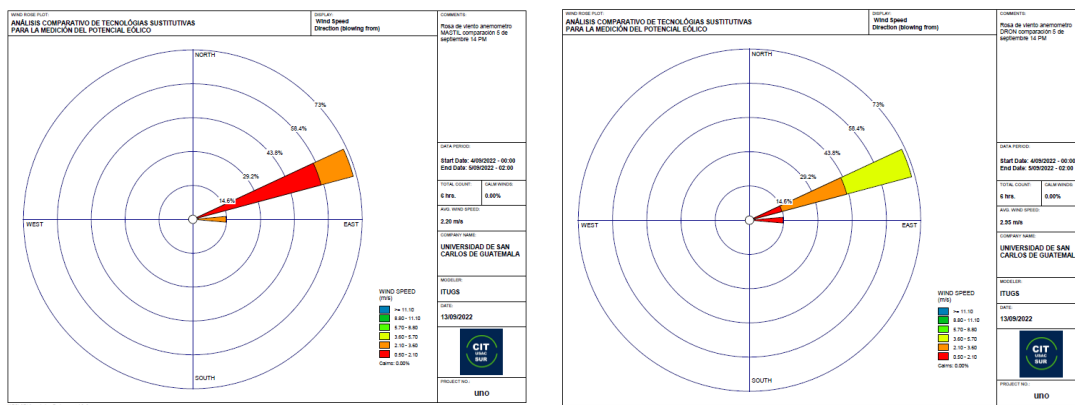
- Vega, J. C., & Ramírez, S. (2014). *Fuentes de energía: Renovables y no renovables aplicaciones*. Alpha Editorial.
- Wearmouth, C. (2022). *Flying Anemometers: Performance Assessment of a Miniaturized Sonic Anemometer for Measuring Wind from a Drone*. Arts. [Unpublished master's thesis, University of Calgary]. <http://dx.doi.org/10.11575/PRISM/39576>
- Wetz, T., Wildmann, N., & Beyrich, F. (2021). Distributed wind measurements with multiple quadrotor unmanned aerial vehicles in the atmospheric boundary layer. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(5), 3795-3814. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3795-2021>.
- Wolf, C. A., Hardis, R. P., Woodrum, S. D., Galan, R. S., Wichelt, H. S., Metzger, M. C., ... & de Wekker, S. F. (2017). Wind data collection techniques on a multi-rotor platform. *Proceedings of 2017 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*. IEEE. 32-37. <https://doi.org/10.1109/SIEDS.2017.7937739>.
- Zheng-nong, L. I., Hao, F. E. N. G., Ou, P. U., & Yi-jun, S. H. E. N. (2021). Boundary layer wind profile measurement based on a six-rotor UAV anemometer. *Engineering Mechanics*, 38(8), 121-132. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.08.0553>.
- Zimmerman, S. (2022). *Development of a disturbance observer for wind estimation by multirotor drone using machine learning*. [Master's Thesis, University of British Columbia]. <https://doi.org/10.14288/1.0413698>.

13 Apéndice

Apéndice uno



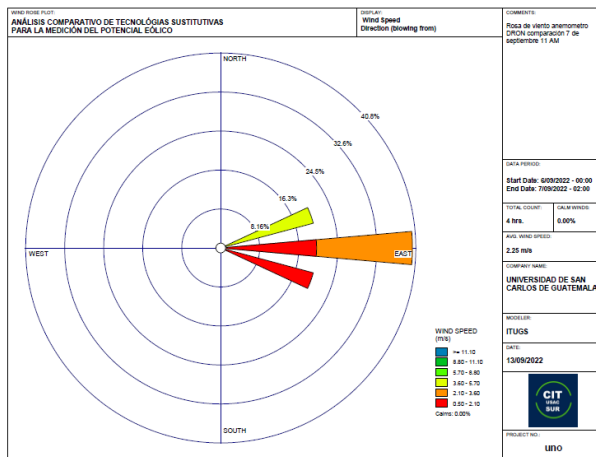
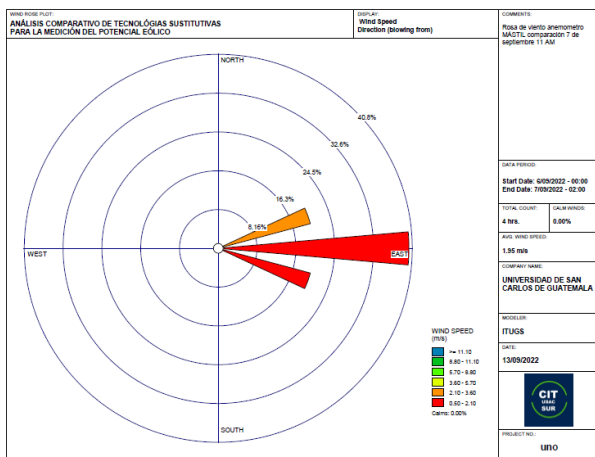
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 5 de septiembre de 2022 a las 11:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. La diferencia apreciable en las imágenes muestra que la velocidad del viento medida con el dron es superior a la de referencia del mástil



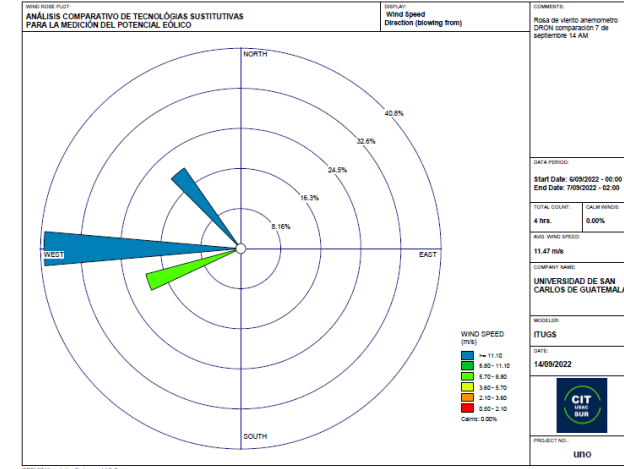
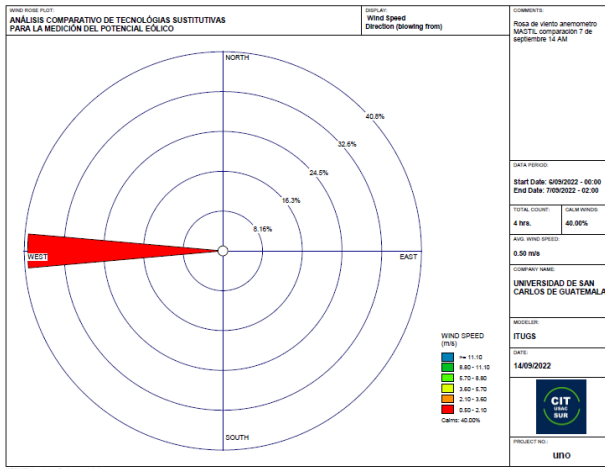
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 5 de septiembre de 2022 a las 14:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-



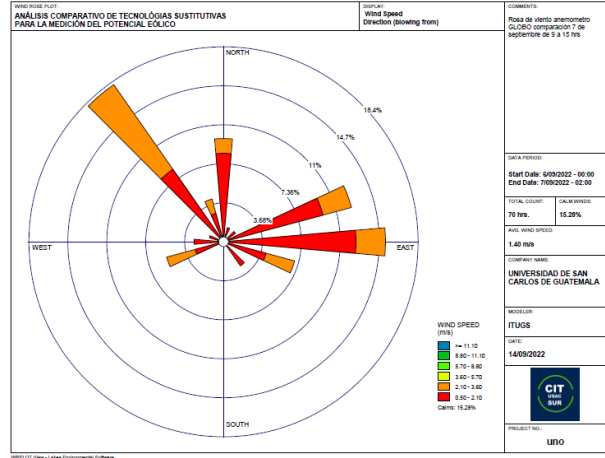
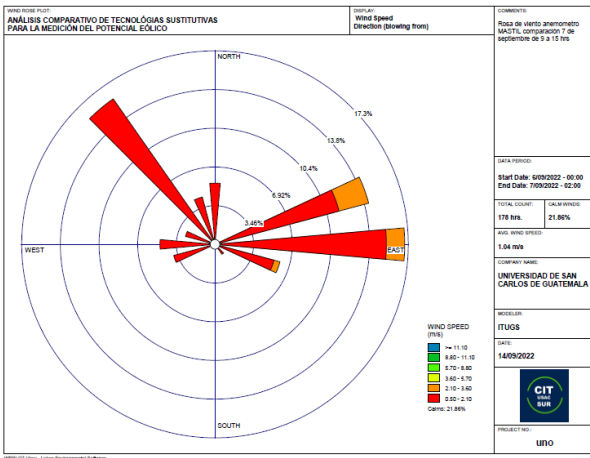
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 7 de septiembre de 2022 a las 11:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2.



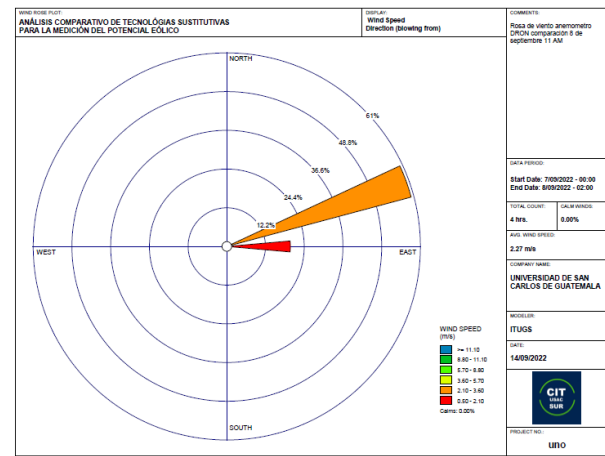
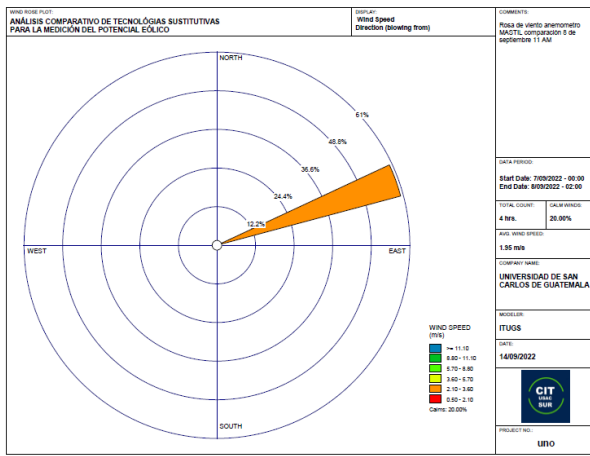
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 7 de septiembre de 2022 a las 14:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. La diferencia apreciable en las imágenes muestra que la velocidad del viento medida con el dron es superior a la de referencia del mástil.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-



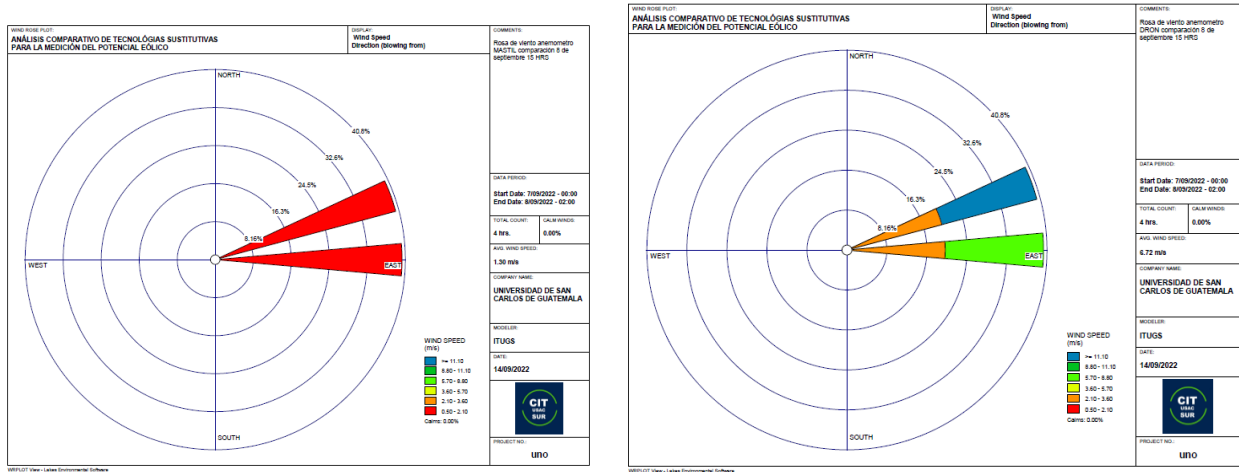
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso de globos inflados con helio (derecha); fecha y hora, 7 de septiembre de 2022 de 10:00 a 15:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2.



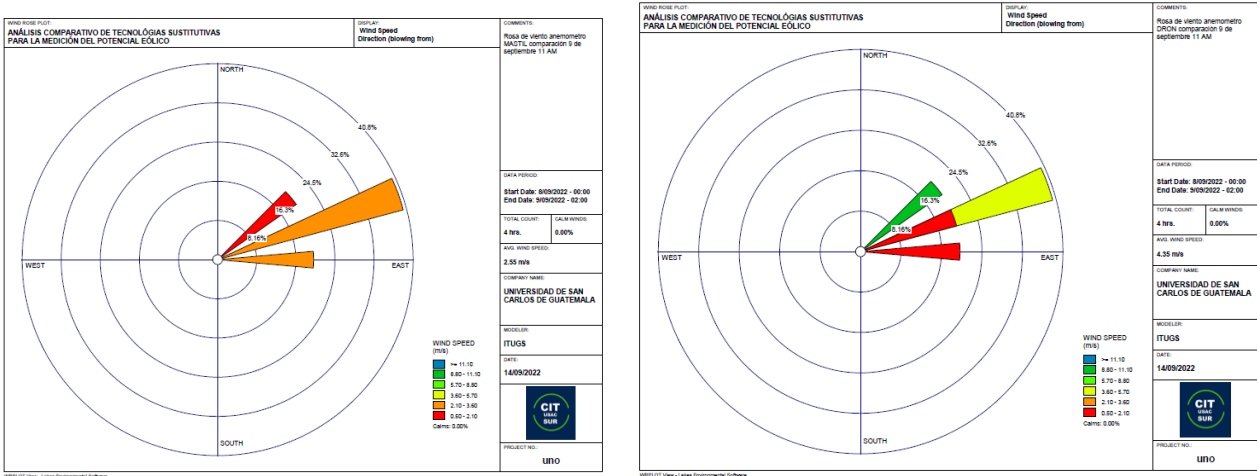
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 8 de septiembre de 2022 a las 11:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. La diferencia apreciable es mínima velocidad del viento obtenida con el dron.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-



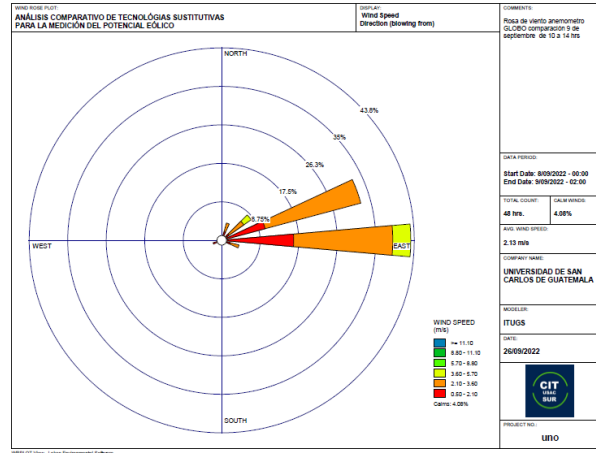
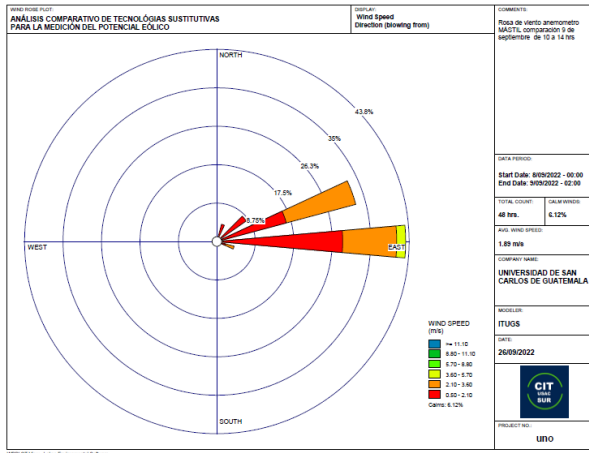
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 8 de septiembre de 2022 a las 15:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. La diferencia apreciable es significativa en la velocidad del viento obtenida con el dron.



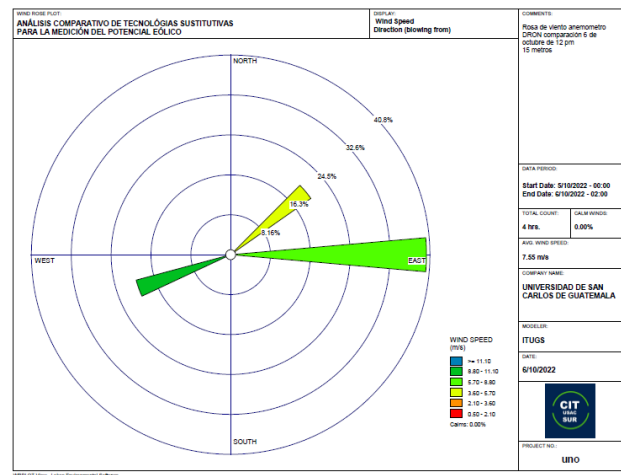
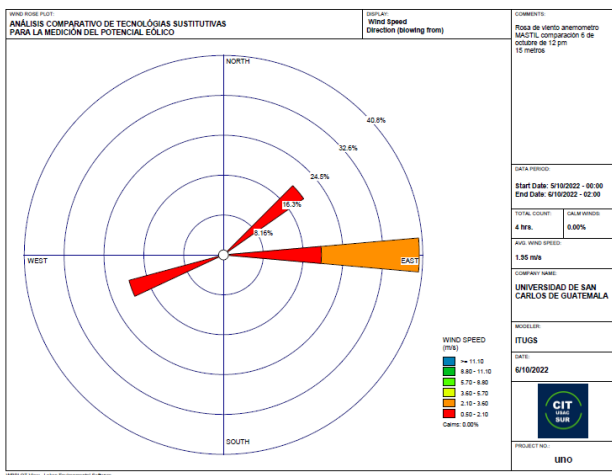
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 9 de septiembre de 2022 a las 11:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. La diferencia apreciable es significativa en la velocidad del viento obtenida con el dron.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-



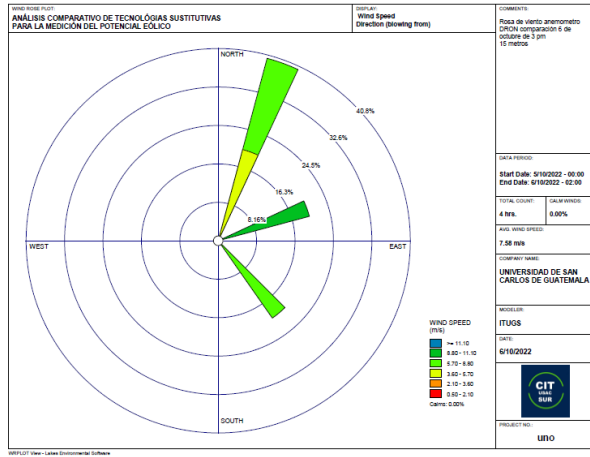
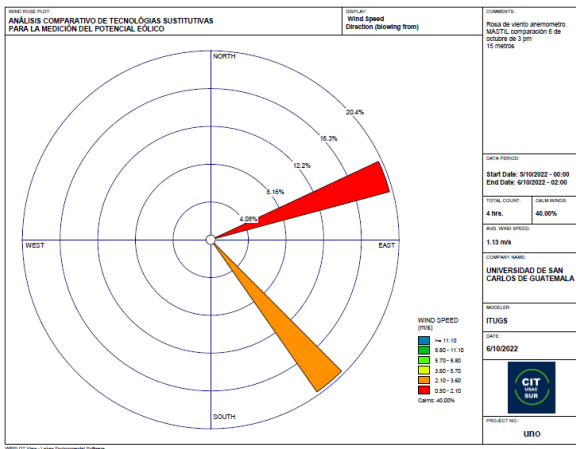
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso de globos inflados con helio (derecha); fecha y hora, 9 de septiembre de 2022 de 10:00 a 14:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2.



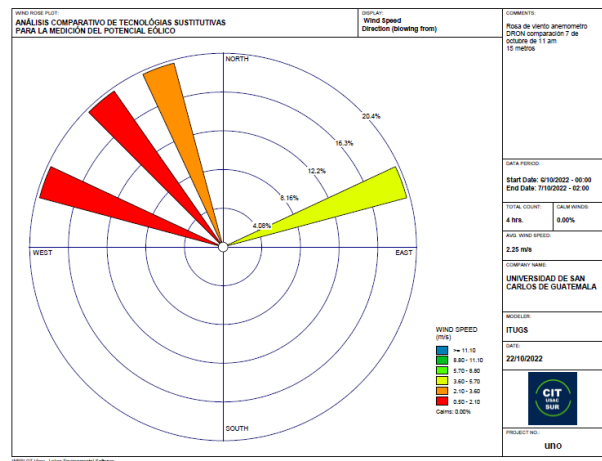
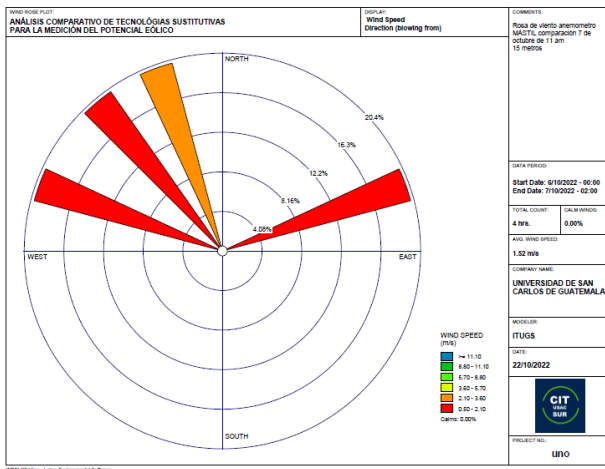
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 6 de octubre de 2022 a las 11:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-



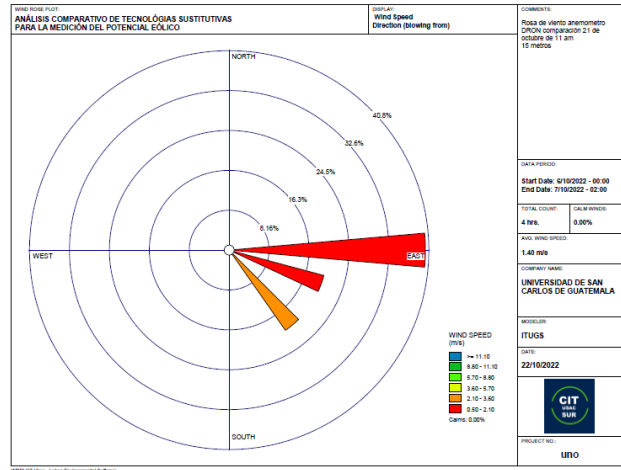
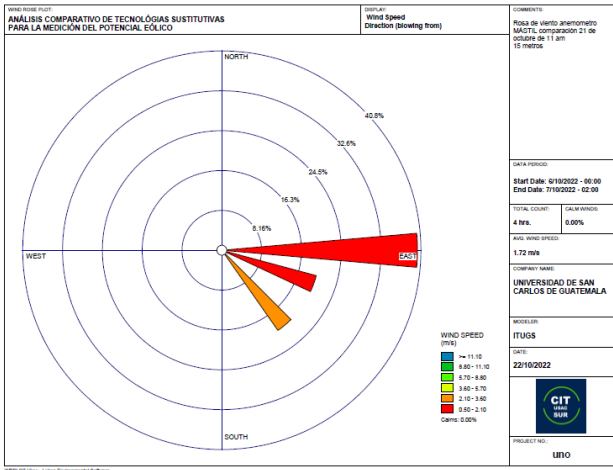
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 6 de octubre de 2022 a las 15:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. En la comparación es posible apreciar la diferencia de datos capturados por el anemómetro del dron, ya que estos no se perciben en la misma magnitud y dirección por el anemómetro instalado en el mástil.



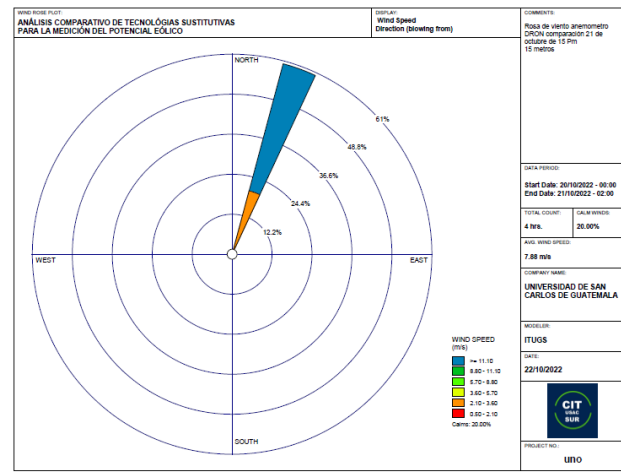
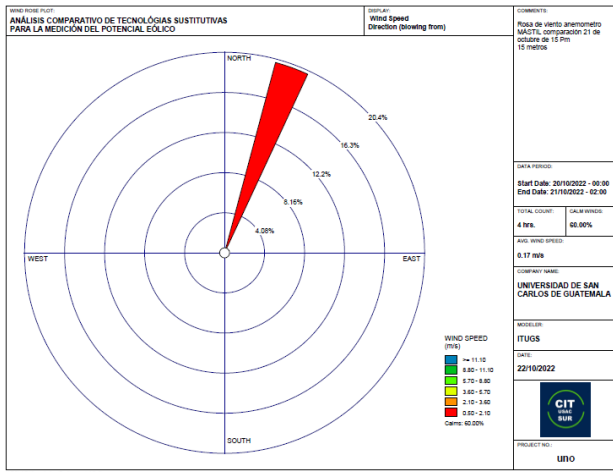
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 7 de octubre de 2022 a las 11:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. Los datos de ambos instrumentos, anemómetro instalado en dron e instalado en mástil, reflejan un comportamiento similar casi igual.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-



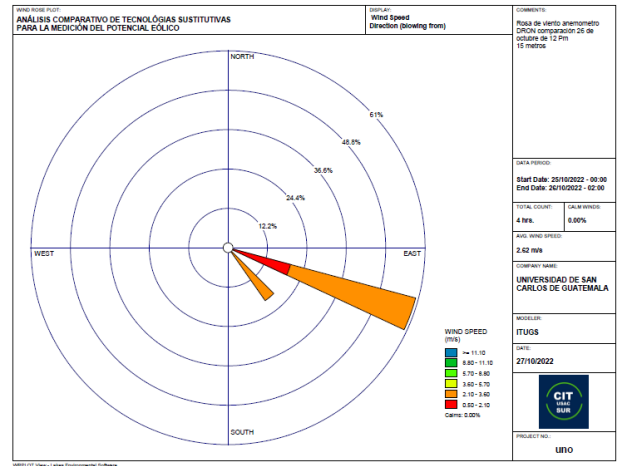
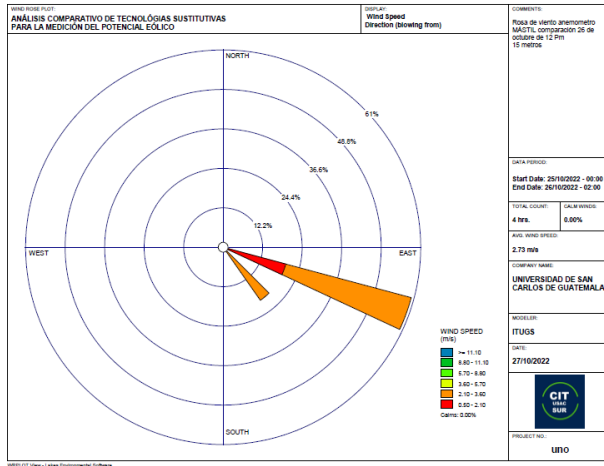
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 21 de octubre de 2022 a las 11:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. Estos datos son los más similares en magnitud obtenidos con los dos instrumentos.



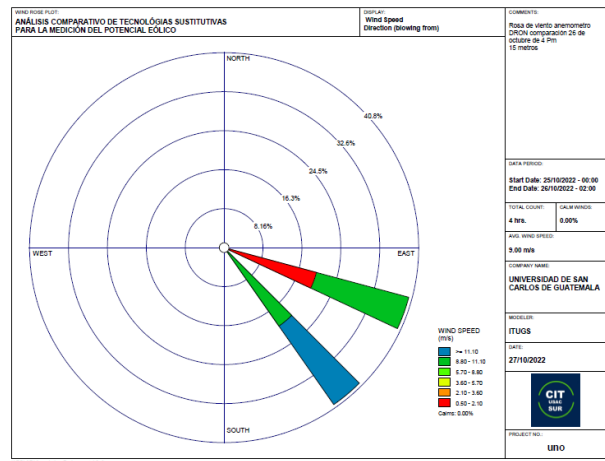
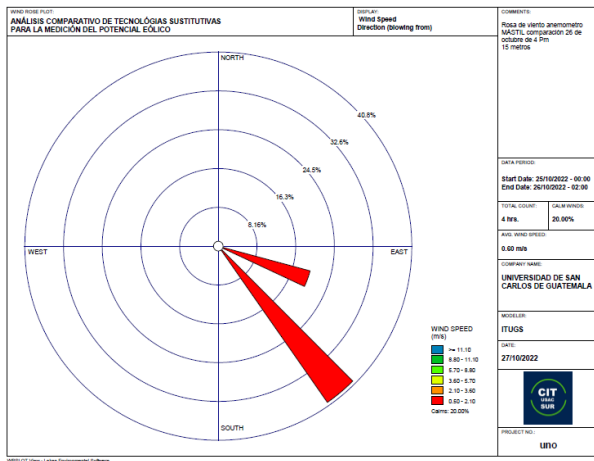
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 21 de octubre de 2022 a las 15:00 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. La magnitud de los datos obtenidos con el anemómetro del dron es diferente en comparación con los obtenidos con el mástil.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-



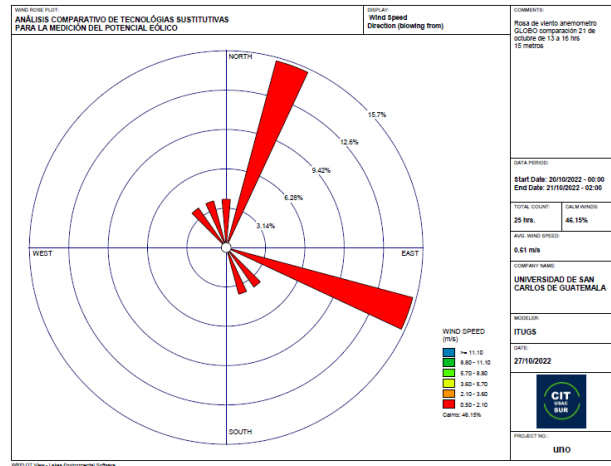
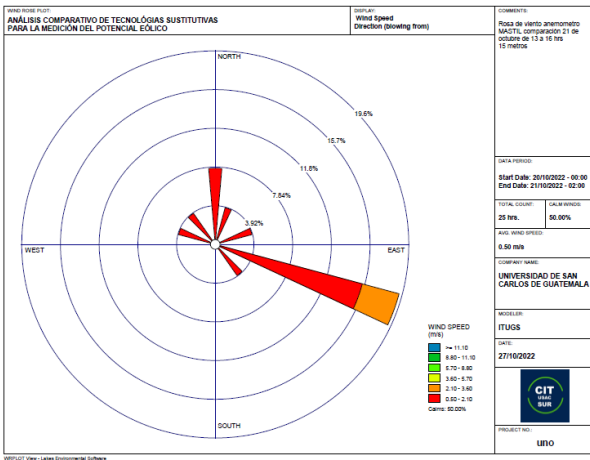
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 26 de octubre de 2022 a las 12 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. Los datos obtenidos durante esta medición son casi idénticos con el uso de ambos instrumentos.



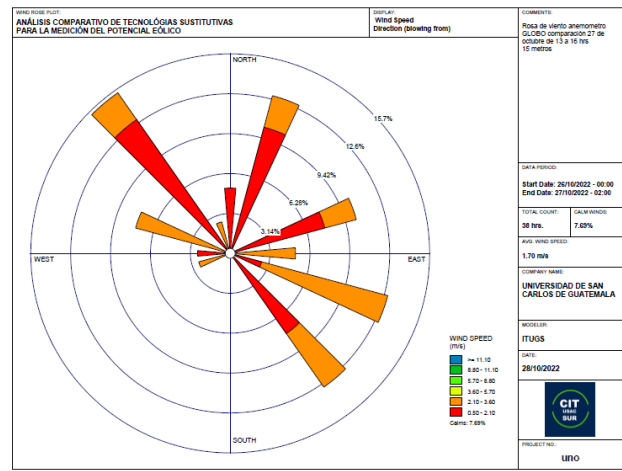
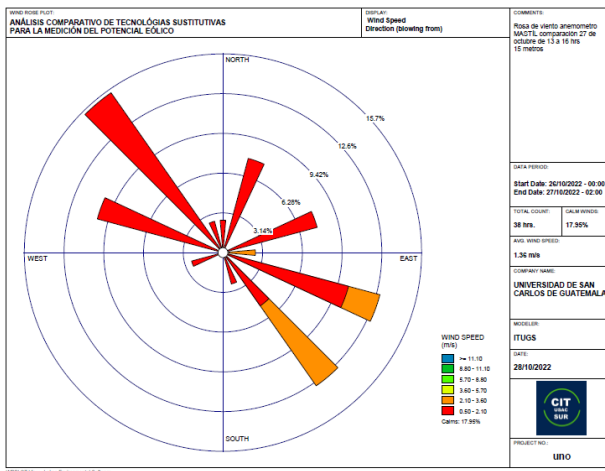
Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso del dron (derecha); fecha y hora, 26 de octubre de 2022 a las 16 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. Los datos difieren mucho en magnitud entre las mediciones obtenidas con ambos instrumentos.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-



Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso de globos inflados con helio (derecha); fecha y hora, 21 de octubre de 2022 de 13 a 16 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. Los datos difieren mucho en magnitud entre las mediciones obtenidas con ambos instrumentos.



Rosas de viento producto de los datos obtenidos con el anemómetro instalado en el mástil (izquierda) y el anemómetro elevado con el uso de globos inflados con helio (derecha); fecha y hora, 27 de octubre de 2022 de 13 a 16 hrs, se considera la misma dirección del viento dada la cercanía entre los dos instrumentos durante la medición, imágenes obtenidas con el empleo de WRPLOT VIEW 8.0.2. Los datos son muy similares.

14 Aspectos éticos y legales

La investigación no requirió de una opinión favorable de algún comité de ética o licencias estatales para su desarrollo.

15 Vinculación

Se realizaron acercamientos con delegados de INDE e INSIVUMEH, sin embargo, no se logró un vínculo directo, esto se debió a que INDE, solicitó primero un convenio específico entre USAC e INDE para promover la vinculación inter institucional, esta información fue trasladada por su delegado MA. Ing. Juan Fuentes; hasta la fecha de entrega del presente informe no se logra aun el convenio. En el caso de INSIVUMEH, se contó con la visita de un delegado, Ing. Gustavo Samayoa el día 26 de octubre del presente año, sin embargo, también solicitó que la vinculación se manejara a través de una carta de entendimiento entre ambas instituciones, de igual forma no se logró alcanzar lo solicitado por INSIVUMEH en la fecha de entrega del informe final de la investigación. Se espera continuar con la vinculación con estas instituciones después de obtener los acuerdos solicitados, aunque la investigación haya finalizado.

16 Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual

Se espera realizar al menos un documento con los resultados de la investigación y una presentación pública.

17 Aporte de la propuesta de investigación a los ODS:

La investigación contribuye al alcance del Objetivo de Desarrollo Sostenible Energía Asequible y No Contaminante, ya que en los estudios necesarios para la instalación de turbinas eólicas, se requiere del análisis del potencial eólico en un sitio particular. Su principal repercusión es teórico-académica ya que contribuye de forma pionera a la exploración de líneas de investigación sobre anemometría y tecnologías sustitutivas para estos fines, los cuales hasta el momento no se han desarrollado a nivel USAC.

Informe final proyecto de investigación 2022

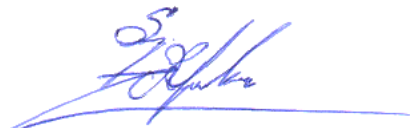
Dirección General de Investigación –DIGI-

18 Orden de pago final (incluir únicamente al personal con contrato vigente)

Nombres y apellidos	Categoría (investigador /auxiliar)	Registro de personal	Procede pago de mes (Sí / No)	Firma



19 Declaración del Coordinador(a) del proyecto de investigación

El Coordinador de proyecto de investigación con base en el *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación*, artículos 13 y 20, deja constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordina ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.

MA. Ing. Sergio Alejandro López Rodríguez Coordinador del Proyecto de Investigación	 Firma
Fecha: 28/11/2022	

20 Aval del Director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario


De conformidad con el artículo 13 y 19 del *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación* otorgo el aval al presente informe mensual de las actividades realizadas en el proyecto (escriba el nombre del proyecto de investigación) en mi calidad de (indique: Director del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario), mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

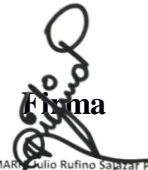
Vo.Bo. MA. Ing. Kenneth Lubeck Corado Esquivel Director Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur ITUGS	 Firma 
Fecha: 28/11/2022	

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

21 Visado de la Dirección General de Investigación

Vo.Bo. Nombre Coordinador(a) del Programa Universitario de Investigación	 Firma Ing. MARCO JULIO RUFINO SÁENZ PÉREZ Coordinador General de Programas de Investigación, Digi-Usac
Fecha: dd/mm/año	

Vo.Bo. Nombre Coordinador General de Programas Universitarios de Investigación	 Firma Ing. MARCO JULIO RUFINO SÁENZ PÉREZ Coordinador General de Programas de Investigación, Digi-Usac
Fecha: dd/mm/año	