

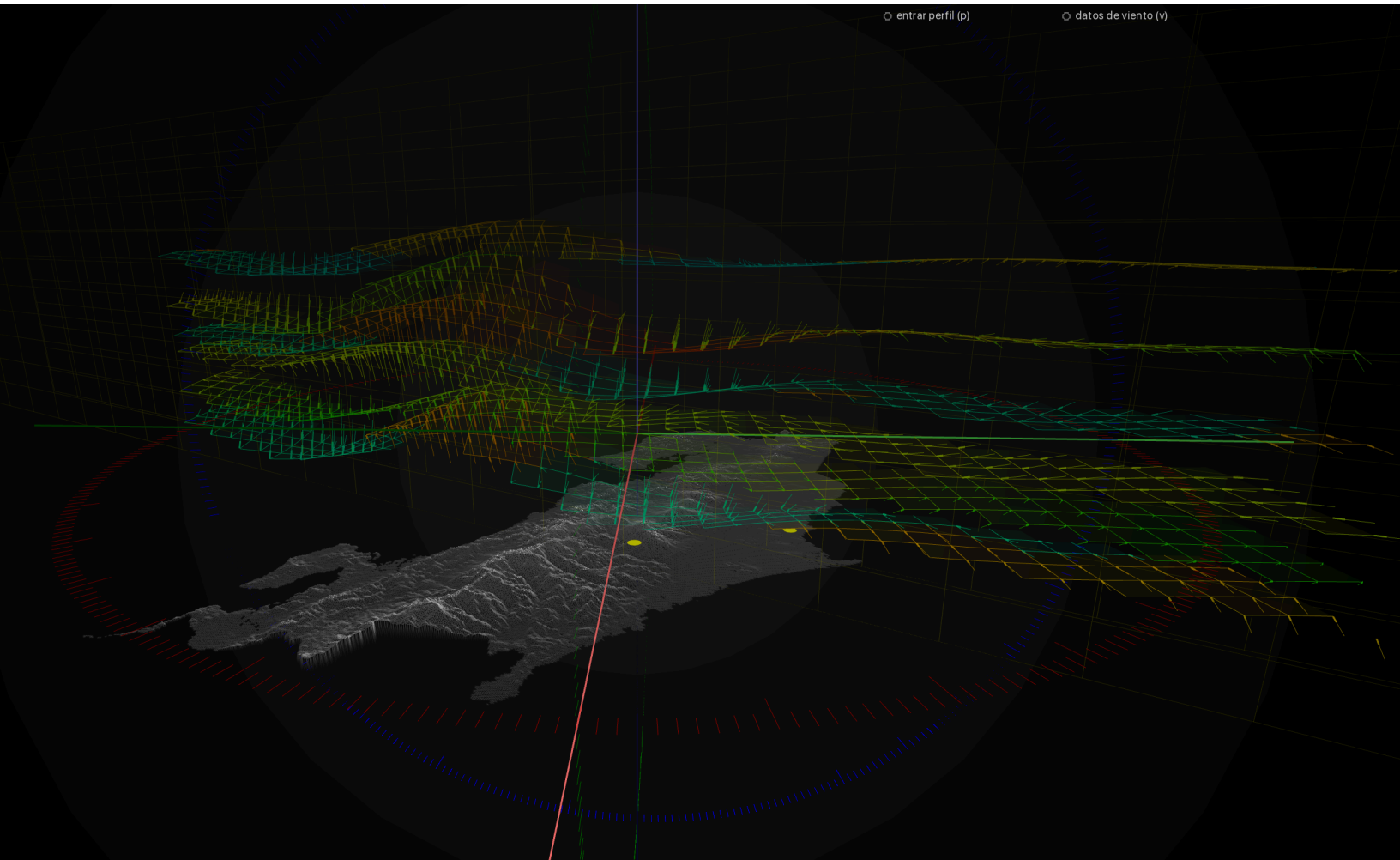
---

# iReal 4.0

## skyGraph: visualización de vientos en Costa Rica



Informe final de proyecto de investigación



---

### Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Diseño Industrial  
Escuela de Matemática

Ph.D. Franklin Hernández-Castro. Escuela de Diseño Industrial

Ph.D. Jorge Monge-Fallas. Escuela de Matemática

Ing. David Segura Solís. Escuela de Diseño Industrial

Bach. Luis Daniel López Rodríguez, Escuela de Física

# Contenido

<b>Nombre del Proyecto.....</b>	<b>3</b>
<b>Autores y direcciones .....</b>	<b>3</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>3</b>
<b>Palabras claves .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Marco teórico .....</b>	<b>7</b>
<b>3 Metodología.....</b>	<b>15</b>
3.1 <i>Modelado de la geografía</i> .....	15
3.2 <i>Obtención de datos atmosféricos de velocidad del viento</i> .....	17
3.2.1 Datos de mediciones directas: .....	17
3.2.2 Datos de mediciones satelitales: .....	18
3.3 <i>Visualización de las velocidades y direcciones del viento</i> .....	21
3.3.1 Automatas/boids .....	22
3.3.2 Flechas en lugar de boids. ....	27
3.3.3 Uso de planos en lugar de flechas, una geografía eólica. ....	28
3.3.5. Animación .....	33
<b>4. Resultados .....</b>	<b>35</b>
4.1. <i>Diseño de la visualización</i> .....	35
4.1.1 Perfiles .....	36
4.1.2 Opacidad .....	37
4.1.3 Animación de los datos entre meses .....	38
4.2. <i>Evaluación de la usabilidad:</i> .....	38
<b>5. Discusión y conclusiones .....</b>	<b>39</b>
<b>6. Bibliografía .....</b>	<b>40</b>

---

## Nombre del Proyecto

**skyGraph:** visualización de vientos en Costa Rica(iReal 4.0) (2016-2018)

**Código del proyecto:** 1330006



## Autores y direcciones

Ph.D Franklin Hernández-Castro (coordinador),

franhernandez@itcr.ac.cr. Escuela de Diseño Industrial

Ph.D Jorge Monge-Fallas, jomonge@itcr.ac.cr. Escuela de Matemática,

Ing. David Segura Solís, dsegura@itcr.ac.cr. Escuela de Diseño Industrial

Bach. Luis Daniel López Rodríguez, llopez@itcr.ac.cr. Escuela de Física

---

## Resumen

La influencia que tiene el relieve del territorio del país sobre el movimiento de los vientos es muy notable. Las barreras naturales, como las montañas que conforman las cordilleras de Costa Rica modifican el flujo del viento y definen la distribución de la humedad y la variación de otras magnitudes físicas en las distintas regiones del país.

El objetivo del proyecto fue desarrollar skyGraph, una herramienta para visualizar cada una de las componentes del viento en tres dimensiones y su interacción con la superficie de Costa Rica.

Por la experiencia del grupo iReal en la visualización de datos científicos, ya se contaba con un sistema para visualizar la geografía 3D de Cota Rica, gracias a la colaboración con el laboratorio PRIAS-CeNAT. Sin embargo, este nuevo proyecto nos obligó (por la gran cantidad de datos) a migrar todo el sistema a uno nuevo sobre la base de C++, utilizando la biblioteca OpenFrameworks .

Para la elección de la base de datos se tomó en cuenta que la fuente de información más confiable para conocer la velocidad del viento son los datos de las estaciones meteorológicas, ya que son mediciones directas de la magnitud y dirección del viento. Sin embargo, estas estaciones requiere de una gran inversión económica y en capital humano para garantizar su funcionamiento de manera correcta. Por esta razón no

existen muchos puntos en el país en los cuales se generen datos confiables para monitorear el movimiento de la atmósfera sobre Costa Rica.

Debido a esta situación se decidió, en conjunto con el Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica (**CIGEFI**), utilizar datos provenientes de modelos computacionales mediante el proceso de re-análisis. Este método utiliza mediciones directas, observaciones satelitales y modelos teóricos de predicción para generar un set de datos uniformes que cumplan las ecuaciones de movimiento planteadas, las que funcionan también a modo de validación. Estos datos permiten un primer acercamiento a la visualización de las corrientes sobre Costa Rica en distintas capas de la atmósfera y al análisis de su relación con el relieve del territorio.

En conjunto con los científicos de CIGEFI se establecieron las necesidades que el sistema debía satisfacer y en un proceso de constante retroalimentación se desarrolló skyGraph. Herramienta que permite la visualización de vientos en 11 niveles de altura (capas isobáricas), durante 12 meses y con la posibilidad de establecer perfiles de datos en cualesquier zona del país.



---

### **Palabras claves**

Visualización de información, visualización de vientos, clima, Costa Rica, Visualización 3D.

---

## 1. Introducción

Costa Rica se encuentra en la parte tropical del Hemisferio Norte, forma parte del Istmo Centroamericano y está rodeada por el Océano Pacífico en el Oeste y por el Mar Caribe en el Este. Debido a su posición geográfica, el clima es de tipo tropical y es modificado constantemente por diferentes factores como el relieve (la disposición de las montañas, llanuras y mesetas), la situación con respecto al continente (condición ístmica) y la influencia oceánica (los vientos o las brisas marinas y la temperatura de las corrientes marinas). Sin embargo, el comportamiento de las variables meteorológicas más determinantes está definido principalmente por la circulación general de la atmósfera [1], es decir el movimiento a escala planetaria y local de los vientos a través del territorio

*“Dependiendo del tipo de viento, la ubicación geográfica y la época del año, la velocidad de los vientos que afectan a una determinada zona será distinta. Mapas eólicos que muestren las velocidades de diseño del viento de un país particular resultan ser una herramienta indispensable para estimar las fuerzas de viento”* (Boletín Estructuras, 2015, p4).

Este mismo boletín indica que Costa Rica no cuenta con mapas eólicos oficiales que brinden información completa y actualizada. En general los vientos modulan el comportamiento y la distribución de las lluvias en el territorio nacional, por lo que conocer su comportamiento es de vital importancia (Boletín Meteorológico Mensual, 2015). Para instituciones como AyA, y el IMN es de vital importancia visualizar en 3D sobre la topografía del país, el comportamiento de los vientos y cómo los sistemas montañosos interfieren en la dinámica de vientos que gobiernan nuestro país. El proyecto pretende responder la pregunta:

*¿Cómo se comportaron los vientos sobre el territorio nacional, durante un año y cómo estos fueron influenciados por la topografía del país?*

La información que se obtendría se puede correlacionar con situaciones de emergencia como erupciones volcánicas o propagación de plagas en los cultivos. Además de ser útil para la industria agroforestal, por ejemplo, en periodos secos, entender el comportamiento de los vientos a diferentes alturas es de gran utilidad para entender mejor su influencia sobre el gran número de incendios forestales que afectan nuestro país, además de la

posibilidad de definir zonas con características adecuadas para la generación de energía eólica.

Por otro lado, el movimiento de las celdas de circulación a escala sinóptica y los chorros o inestabilidades en el flujo del viento a escala local limitan la variabilidad del clima sobre Costa Rica. Debido a la influencia de estos fenómenos existen dos estaciones definidas: la estación seca, que comienza a principios de Diciembre y se extiende hasta finales de Abril; y la estación lluviosa, que inicia a principios de Mayo y va hasta finales de Noviembre. El comportamiento de las variables atmosféricas promedio en largos periodos de tiempo ha sido estudiado ampliamente y se conocen sus principales características. Sin embargo, el tiempo atmosférico varía muy rápidamente y es muy difícil de predecir localmente pues existen muchas variables que modifican las condiciones atmosféricas.

El objetivo principal del proyecto **skyGraph**: visualización de vientos en Costa Rica (iReal 4.0) fue desarrollar una herramienta computacional que permita visualizar el movimiento de la atmósfera sobre el territorio del país. El grupo de investigación cuenta con el modelo de la geografía del país, que se desarrolló de los datos del proyecto **PRIAS** de **CeNAT**. Estos datos permiten crear un mapa en tres dimensiones en donde se tienen datos muy precisos del relieve de todo el territorio de Costa Rica.

Esta herramienta de visualización permite conocer, no solo la distribución espacial y temporal de los vientos, sino también analizar la interacción entre la atmósfera, las cordilleras, mesetas y valles que conforman el país.

Actualmente existen varios sistemas capaces de mostrar la visualización de los vientos sobre Costa Rica, pero todos estos sistemas trabajan solo en dos dimensiones y brindan información del movimiento de la atmósfera a una altura específica a la vez. La trayectoria real de los vientos no está limitada a un plano específico, sino que los vientos se mueven en tres dimensiones. Conocer el movimiento en la dirección radial, es decir saliendo o entrando al plano de latitudes y longitudes, y la relación que tiene este tipo de movimiento con el relieve del país es la principal ventaja de la herramienta generada en el proyecto **skyGraph**.



---

## 2. Marco teórico

El grupo de visualización de datos científicos iReal, del programa eScience, ha estado trabajando en este tipo de problemas por años y tiene la experiencia para realizar esta visualización a partir de los datos. Trabajando en conjunto, con los científicos en clima del **CIGEFI**, se realizaron minerías de datos, que de otro modo, sería casi imposible hacer por el tiempo que llevaría. La visualización de datos permite a los científicos ver posibilidades que no habían visto antes y que pueden definir las líneas de investigación futuras.



*“One of the modern efficient methods of various scientific data analysis is computer visualization of these data or in other words - scientific visualization, which is widely used in different theoretical and experimental researches.*

*It must be mentioned that method of scientific visualization can be used for analysis of data source of different nature, aims of analysis can be different as well as the corresponding graphic data presentations.*

*It can be said that the main aim of scientific visualization is to make invisible visible. Under invisible we mean abstract and real objects and events of different scale that human eye cannot see. For example such macro structures as galaxies, and microstructures and nanostructures of the real world as well.”*

*Editor-in-Chief M.N. Strikhanov ,  
Rector of National Research Nuclear University "MEPhI", Russia [1]*

En el caso de iReal, la experiencia adquirida al trabajar conjuntamente con los investigadores de Ovsicori nos ha permitido tener a disposición un modelo de la geografía nacional (figura 1) (a partir de los datos de **CENAT-PRIAS**) y con ellos se hacen posibles muchas cosas, una de ellas es ver el comportamiento de los vientos con la relación con la geografía nacional. Del mismo, modo se ha generado mucha experiencia en el modelado de datos 3D georeferenciados, lo que plantea una buena plataforma para esta iniciativa.

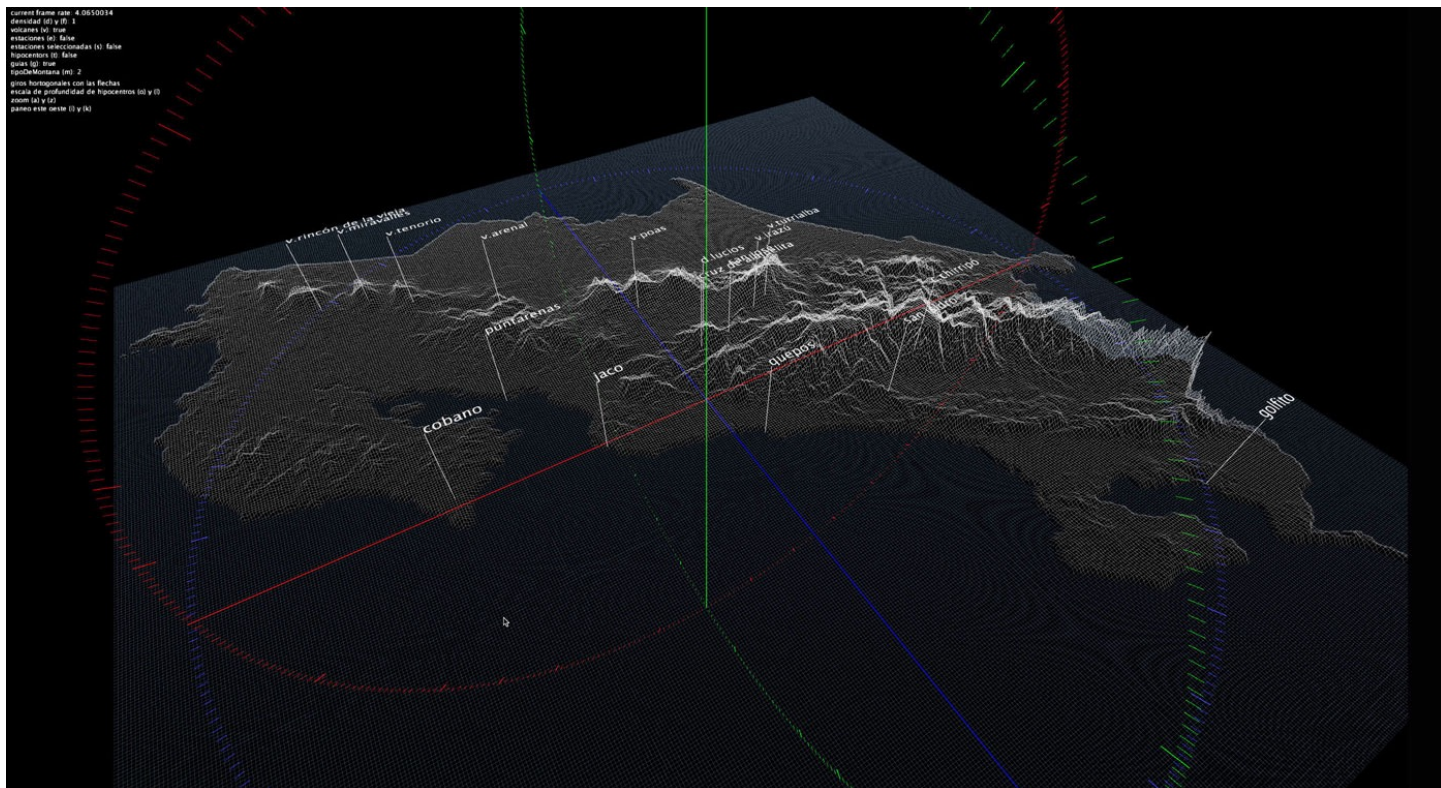


Fig 1. Modelo 3D de Geografía de Costa Rica, iReal 3.0 / 2016. Fuente de los datos PRIAS-CENAT

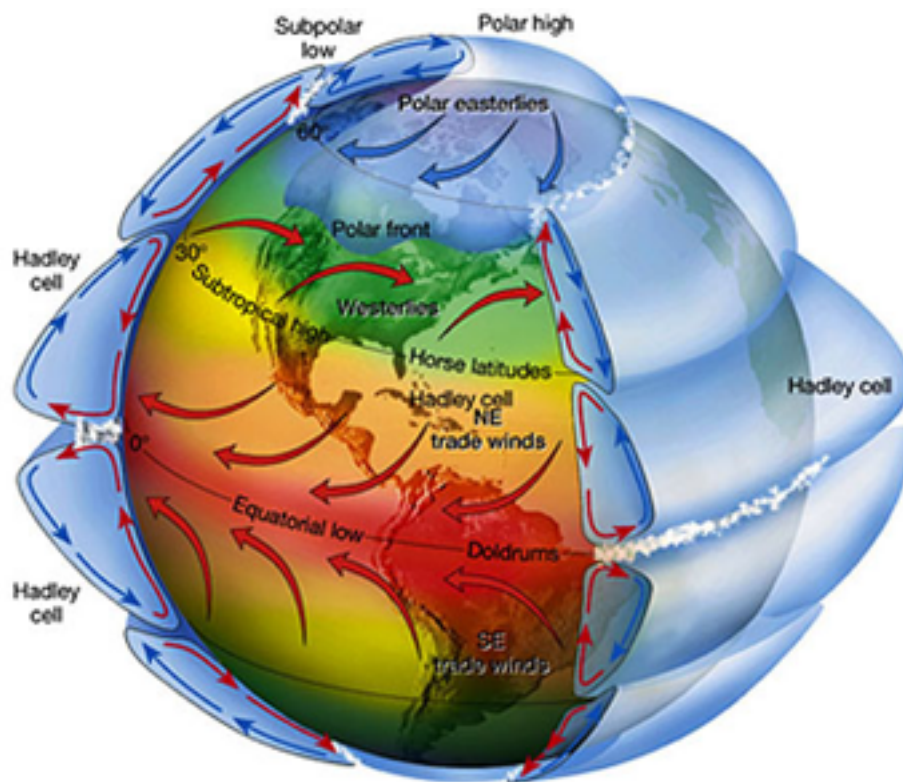
El comportamiento general de los vientos durante el ciclo anual se puede describir mediante el análisis de la circulación general planetaria, este término se refiere a los sistemas más o menos permanentes de la troposfera y la estratosfera, en los cuales se describen los campos de los elementos meteorológicos como promedios en largos intervalos de tiempo. Estos grandes sistemas de circulación de los vientos se producen debido a que la atmósfera se calienta por la acción del sol de un modo desigual. En general, las zonas cercas del Ecuador reciben más energía proveniente del Sol y son más calientes que las regiones polares del planeta. Este calentamiento desigual es el motor que mueve el aire en la troposfera [3].

El aire que se calienta en el Ecuador, es ligero y asciende, mientras que el aire frío en los polos es pesado y desciende. Si no fuera por la rotación terrestre, se establecería una corriente de aire desde los polos al ecuador al nivel del suelo y una corriente en dirección contraria en altura. Pero debido a la rotación del planeta, la circulación se divide en tres sistemas: celda de **Hadley**, es la más extensa porque se ubica en la región tropical desde el Ecuador hasta los 40 grados de latitud; celda de **Ferrel**, se ubica desde los 40 grados hasta los 70 grados de latitud, gira en la dirección contraria a los demás sistemas; y celda **Polar**, es el sistema más pequeño y cubre las regiones polares. La región donde se encuentran las celdas de



Hadley se conoce como la **Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ)** y está caracterizada por fuertes lluvias debido a la convergencia de los vientos [4].

El movimiento del viento en estas celdas no se da solo en la dirección Norte/Sur o viceversa. Debido al efecto de la rotación planetaria, los vientos son desviados por la fuerza de **Coriolis**. De este modo, se forman estructuras más complejas, pero que de igual modo tienden a distribuir el calor. En la figura 2 muestra las celdas de circulación atmosférica y la dirección general de los vientos en la Tierra. Este sistema de circulación general planetaria define el comportamiento promedio de una gran cantidad de variables meteorológicas. Las zonas donde los vientos convergen se caracterizan por **bajas presiones** y, debido a los sistemas de baja presión, **presentan lluvias abundantes**. Al contrario, la divergencia de los vientos produce sistemas de **alta presión** que se asocian al **buen tiempo** [4]. De la misma forma existe una relación entre los sistemas de circulación y muchos fenómenos atmosféricos.



*Fig 2. Celdas de circulación atmosférica y dirección general de los vientos según el sistema de circulación general planetaria [4].*

En nuestro caso, el clima de Costa Rica está definido por el movimiento de los vientos en las celdas de circulación atmosférica. La Zona de Convergencia Intertropical se ubica sobre el territorio del país durante el

verano y otoño del Hemisferio Norte, debido a la posición del planeta con respecto al Sol. Cuando los vientos sobre la superficie se encuentran en esta región convergen, lo que significa que suben hacia las capas superiores de la atmósfera. Este proceso de convergencia hace que la humedad se condense y se generen nubes que producen una gran cantidad de precipitación. Por esta razón la estación lluviosa inicia a principios de Mayo y se mantiene hasta finales de Noviembre.

Durante el invierno y primavera del Hemisferio Norte, la **ITCZ** se traslada hacia el Hemisferio Sur. Como se muestra en la figura 2, sobre Costa Rica existe una corriente de escala sinóptica que se mueve por la superficie de Norte a Sur y, por la rotación de la Tierra, se desvía de Este a Oeste. El efecto neto son vientos hacia el Suroeste conocidos como los vientos alisios, que actúan sobre el territorio a partir de Diciembre y definen el inicio de la estación seca, que se extiende hasta finales de Abril. En esta época disminuye notablemente las lluvias sobre Costa Rica, excepto en la región atlántica. Sobre la provincia de Limón se mantienen elevados niveles de precipitación debido a la presencia de la Cordillera Volcánica Central. Esta cadena montañosa hace que los vientos alisios converjan y se generen nubes debido a la condensación de la humedad proveniente del Mar Caribe. Estas intensas lluvias pueden provocar inundaciones que afectan las actividades socioeconómicas de la región [6].

Las siguientes figuras muestran el comportamiento anual de la precipitación en dos regiones que se ubican a lados contrarios de la Cordillera Volcánica Central sobre territorio de Costa Rica.

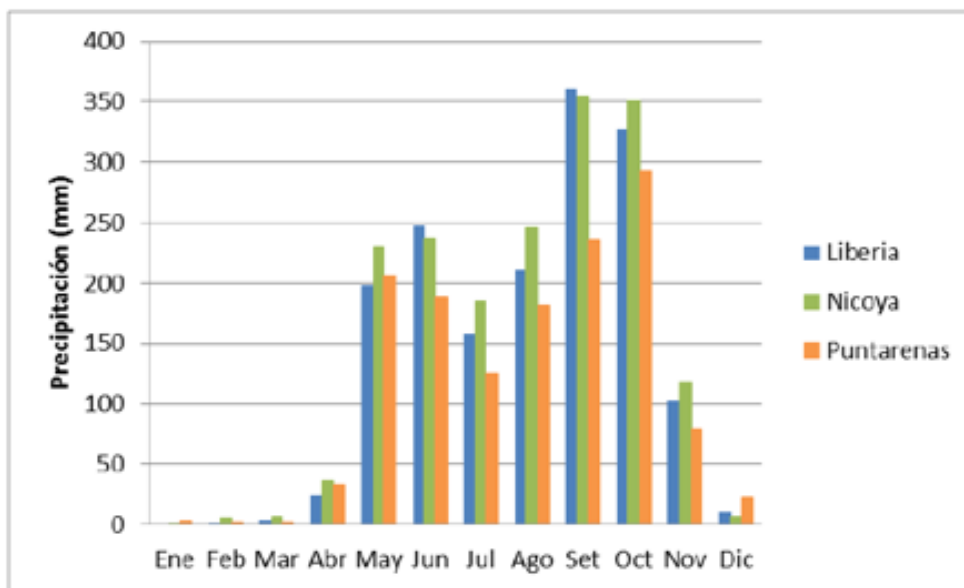


Fig 3. Variación de la precipitación en la Región Pacífico Norte.

La figura 3 muestra la precipitación promedio reportada en cada mes en las estaciones meteorológicas de la Región Pacífico Norte, según los datos públicos del Instituto Meteorológico de Costa Rica en un periodo de 1990 a 2013. Claramente se puede notar la existencia de una estación seca y una estación lluviosa, las dos justificadas por el movimiento de la **Zona de Convergencia Intertropical**. Los meses de Diciembre a Abril se caracterizan por la falta de lluvia, debido a la existencia de los vientos alisios que trasladan la humedad hacia el Sur [7].

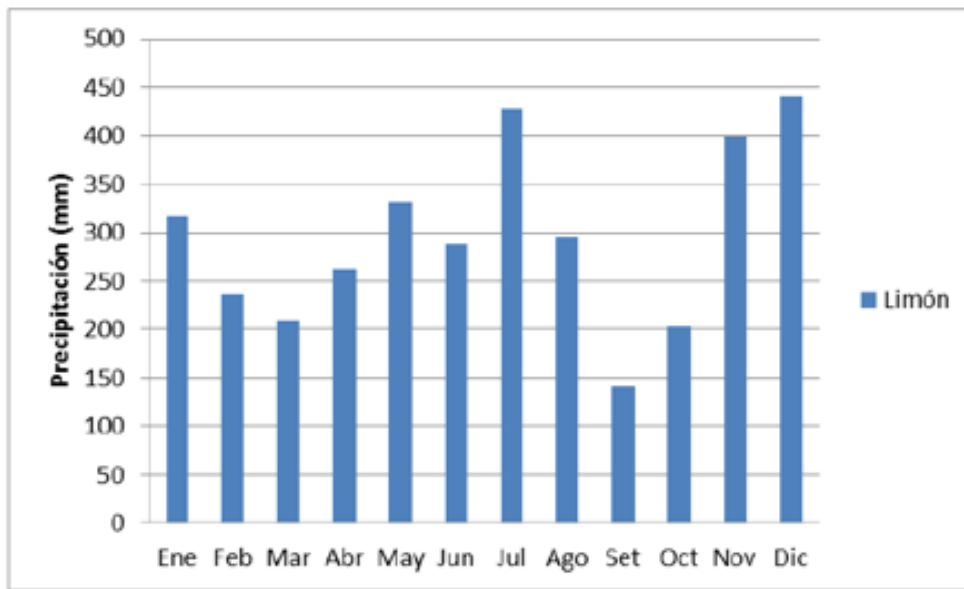


Fig 4. Variación de la precipitación en la Región Atlántica.

La figura 4 muestra la precipitación promedio reportada en cada mes en la estación meteorológica de Limón en la Región Atlántica, según los datos públicos del Instituto Meteorológico de Costa Rica en un periodo de 2007 a 2013. A diferencia del caso anterior, en esta región no existe una estación seca. Los meses de Diciembre a Abril que deberían caracterizarse por la falta de lluvia, presentan elevados niveles de precipitación. Esto se justifica por el choque de los vientos alisios con el relieve del país. Las montañas actúan como una barrera física que no permite el paso de la humedad, ya que los vientos deben subir para superarla y esto produce que se condense el vapor y se generen fuertes lluvias sobre la provincia de Limón.

Este es un claro ejemplo de la importancia del viento y su relación con el relieve del territorio en el estudio del clima de una región. Si se conoce el movimiento de las masas que arrastran la humedad, se puede predecir cómo se comportarán algunas variables meteorológicas como la temperatura y precipitación.

Por convención, en los mapas meteorológicos, la magnitud y la dirección del viento se pueden representar mediante un vector de velocidad. Se utiliza un sistema de coordenadas en donde la componente que va de Sur a Norte se representa por el símbolo  $\bar{u}$  y se le llama componente zonal, la que va de Oeste a Este se representa por el símbolo  $v$  y se le llama componente meridional, finalmente, la que va de abajo a arriba se representa por el símbolo  $\bar{w}$  y se le llama componente vertical del viento.

Brindar información acerca de la **componente vertical del viento** es uno de los objetivos principales del proyecto **skyGraph**, ya que el flujo vertical da información acerca de la convergencia o divergencia de los vientos que se puede traducir en la **posibilidad de precipitación o de buen tiempo**. Cuando la humedad pasa de una capa atmosférica inferior a una superior, tiende a enfriarse y condensarse, lo que produce lluvias.

En meteorología los niveles en altura se trabajan preferiblemente en función de la presión, ya que las capas de la atmósfera no son constantes y lo que interesa son las **superficies isobáricas** porque tienen las mismas propiedades químicas y físicas. La presión se puede expresar en función de la altitud usando principios físicos que se basan en la dependencia de la presión con la profundidad adentro de un fluido como la atmósfera:

$$dP = -pgdz \quad (1)$$

En esta ecuación  $P$  es la presión,  $p$  representa la densidad del fluido,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $z$  representa a la altura. Un cambio positivo en altura es proporcional a un cambio negativo en la presión. El principal problema es que la densidad del aire en la atmósfera no es constante, sino que se puede expresar mediante la Ley de los Gases Ideales como:

$$p = \frac{mP}{kT} \quad (2)$$

Esta ecuación indica que la densidad de una parcela de aire depende de la masa  $m$ , la presión  $P$  de la capa atmosférica, la constante  $k$  y la temperatura  $T$ . Si se combinan las dos ecuaciones anteriores se obtiene una ecuación diferencial:

$$dP = -\frac{mPg}{kT}dz \quad (3)$$

Cuya solución, para el cambio de presión desde el suelo  $P_0$  hasta la presión a una altura  $h$ , está dada por la siguiente función:

$$P(h) = P_0 e^{\frac{-mgh}{kT}} \quad (4)$$

Teóricamente con esta ecuación se puede definir la altitud de cada una de las capas de la atmósfera, representadas por una presión específica. Si se evalúa la función en la superficie de la Tierra se encuentra que  $P_0$  debe ser la presión atmosférica y conforme aumentar la altitud, la presión disminuye. Sin embargo, la ecuación 4 no es útil para definir un eje de coordenadas verticales porque la composición y temperatura de la atmósfera no son constantes, entonces las variables  $\rho$  y  $T$  hacen que las superficies isobáricas no estén necesariamente siempre a la misma altura. Por esta razón no es útil trabajar los vectores de viento con la componente vertical que se mide en metros por segundo. Las bases de datos meteorológicas definen una nueva variable  $w$  llamada la componente de velocidad vertical en coordenados de presión:

$$\omega = \frac{dP}{dt} = \left( \frac{dP}{dz} \right) \left( \frac{dz}{dt} \right) = -\rho g w \quad (5)$$

Según la definición anterior, esta nueva variable representa la velocidad con la que el viento se mueve de una superficie isobárica a otra [8]. Es el equivalente a la velocidad vertical pero se refiere a la velocidad con la que se mueve de una presión a otra, así se puede comprender el movimiento y analizar la convergencia y divergencia sin utilizar la ecuación 4.

Las mediciones de las componentes del viento se pueden realizar de manera directa o indirecta. Las estaciones meteorológicas tienen modernos instrumentos que detectan y adquieren los datos de rapidez y dirección del viento. El problema es que las mediciones en las capas superiores de la atmósfera son muy difíciles de obtener directamente. El método más eficiente y utilizado para medir el movimiento de las masas atmosféricas son las mediciones satelitales. Los satélites utilizan sistemas de radares para adquirir los datos de cada una de las componentes del viento. Los datos satelitales abarcan grandes regiones y muchas capas de la atmósfera, sin embargo son menos precisos que las mediciones directas con instrumentos especializados.

La solución para obtener un set de datos de las componentes del viento que sea preciso y convincente es utilizar técnicas computacionales para limpiar y ordenar los datos. Uno de los métodos matemáticos más

utilizados es el re-análisis. En este proceso se interpretan, relacionan y combinan muchas observaciones diferentes de varias fuentes como datos de distintos satélites, radares y mediciones con instrumentos en superficie, mediante complejos procesos matemáticos para interpolar y extrapolar la información hasta obtener una matriz de datos. Este set de datos cumple las ecuaciones físicas del modelo que se plantea para analizar el sistema, generalmente se incluyen varios principios físicos para desarrollar las ecuaciones de movimiento que gobiernan a las partículas y así obtener un serie de mediciones uniformes en el espacio y en el tiempo [9].

Al utilizar un re-análisis adecuado se combina la precisión de las mediciones directas con la capacidad de abarcar grandes porciones de la atmósfera y obtener información con una alta resolución temporal y espacial.



---

### 3 Metodología

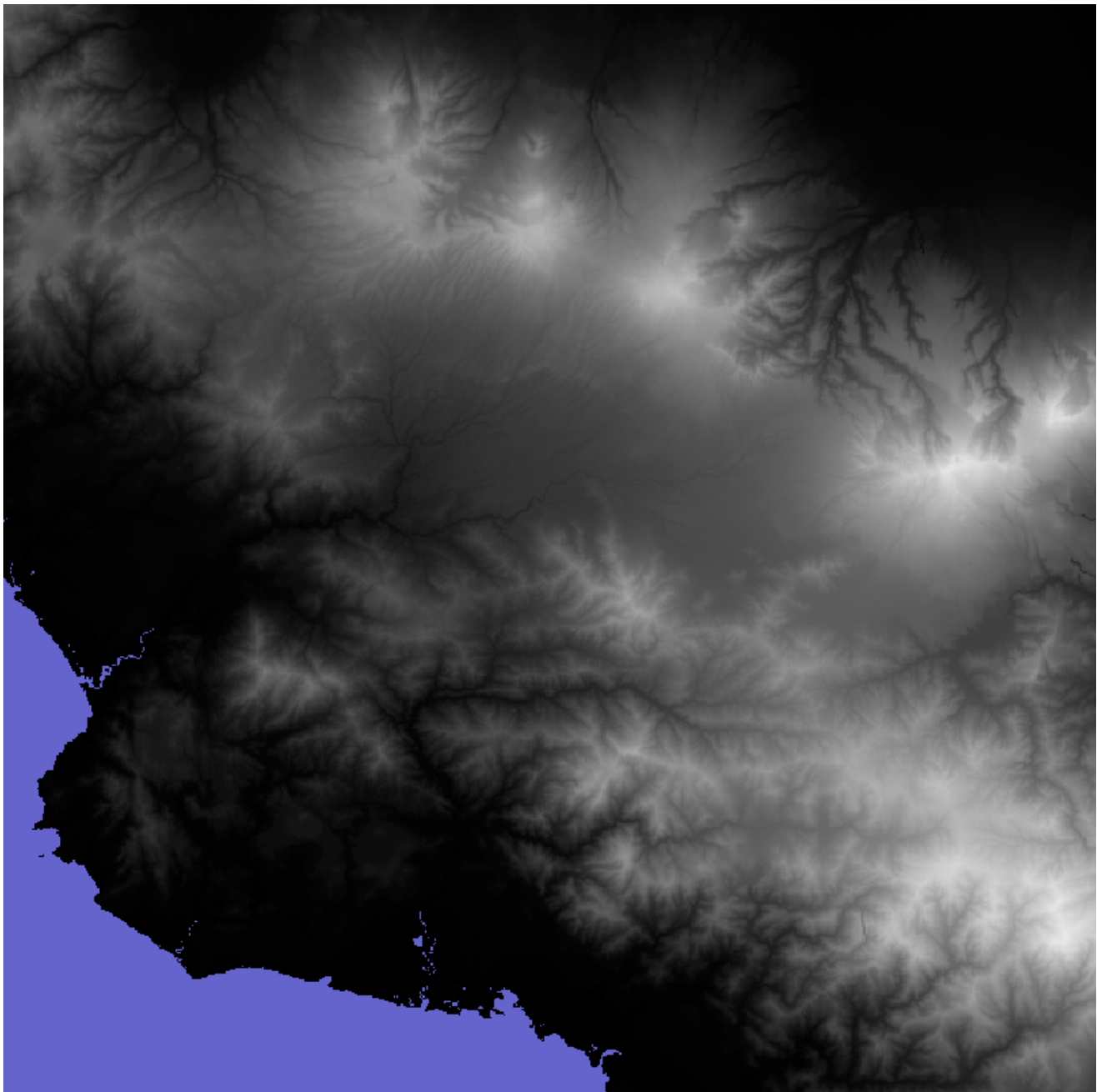
#### 3.1 Modelado de la geografía

En primera instancia, para poder desarrollar el nuevo modelo se convirtió un data set de formato .xyz de más de 233 millones de puntos en una imagen (figura 5), pues fue el modo mas compacto de almacenar los datos, analizarlos y revisar su integridad. [10]



Fig 5. Imagen con 233.000.000 puntos codificando la geografía nacional.

Este modelo es 200 veces más detallado que el usado en el sistema anterior de iReal 3.0 y mucho más correcto (fig. 6). Este imagen (fig. 5) sirvió de insumo a otro algoritmo que convirtió esta imagen en un formato .ply (desarrollado por al universidad de Stanford) que es el formato nativo que usa la biblioteca openframeworks. En este formato se incorporaron la longitud y latitud de cada punto para mayor facilidad de visualización. Tomando en cuenta que se desea que este sistema sea usado para visualizar otros sets de datos alemanes, que es parte del compromiso que se adquirió con el DLR (la agencia espacial alemana) para el siguiente proyecto.



*Fig 6. Acercamiento al valle central mostrando parte del detalle de este modelo, la luminosidad de los puntos codifica su altura.*



Con este “mesh” en .ply y con la eficiencia del C++ fue posible una visualización muchísimo más detallada que la anterior realizada en Java, con una eficiencia similar (figura 7).

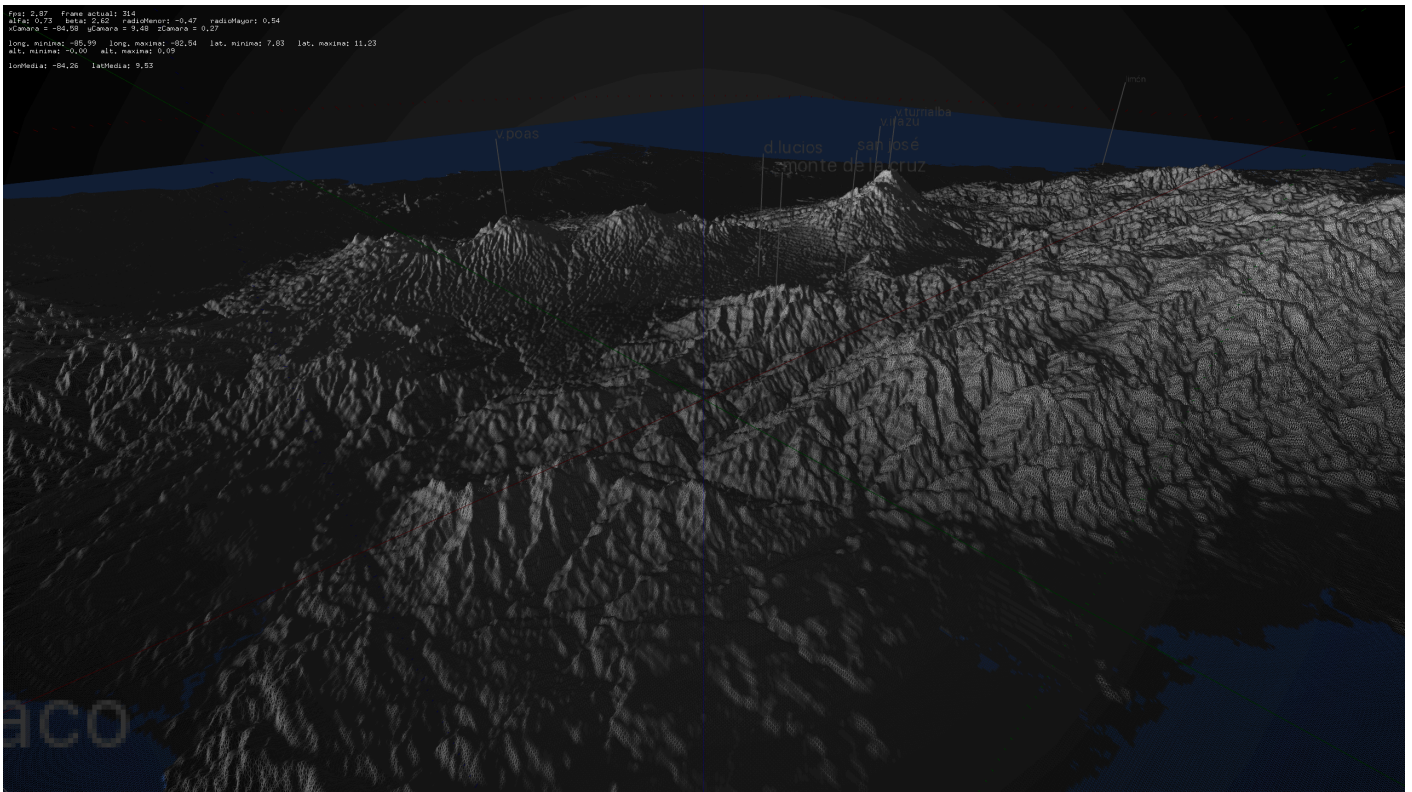


Fig 7. Nuevo modelo mostrando los volcanes del Valle Central.

### 3.2 Obtención de datos atmosféricos de velocidad del viento

El objetivo de la etapa inicial del proyecto fue obtener datos atmosféricos de las componentes **zonal, meridional y vertical** del viento sobre el territorio de Costa Rica. Se hizo una comparación entre distintas fuentes de mediciones directas y mediciones satelitales para determinar cuáles serían los datos más apropiados para la visualización de los vientos sobre el país.

#### 3.2.1 Datos de mediciones directas:

Las mediciones directas son el método más confiable para determinar las características del viento, estos datos se obtienen con distintos instrumentos ubicados en estaciones meteorológicas que pueden ser administradas por empresas privadas o por organizaciones gubernamentales como el Instituto Costarricense de Electricidad (**ICE**) o el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (**IMN**). Sin embargo, las mediciones directas presentan algunos problemas importantes como por

ejemplo la poca cantidad de estaciones y la falta de datos en las capas superiores de la atmósfera.

Se consultaron los datos gratuitos que comparte el IMN pero se descartaron porque son muy pocos puntos, solo quince estaciones meteorológicas en el territorio nacional. Además, las mediciones directas solo presentan datos en la superficie y se desea visualizar varias capas de la atmósfera.



### 3.2.2 Datos de mediciones satelitales:

Las mediciones satelitales resuelven los principales problemas que presentan las mediciones directas porque indican las características del viento en una gran cantidad de puntos y en distintas alturas, lo deseado para visualizar el comportamiento general de la atmósfera en un mapa de vientos. Sin embargo, al no ser mediciones directas se deben utilizar métodos numéricos para estimar los valores que se buscan y se puede perder la precisión y veracidad de los datos.

Para elegir el set de datos a utilizar en el proyecto se compararon las mediciones satelitales de tres de las más importantes agencias meteorológicas a nivel mundial:

- Datos del re-análisis **NCEP/NCAR**: set de datos que incorpora observaciones y predicciones numéricas de los centros National Centers for Environmental Prediction (**NCEP**) y National Center for Atmospheric Research (**NCAR**). Los datos son brindados por la agencia estadounidense National Oceanic and Atmospheric Administration (**NOAA**).
- Datos del re-análisis **ERA-Interim**: set de datos alimentado por observaciones meteorológicas históricas y modelos numéricos del **European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)**. Las mediciones se descargan de forma gratuita en las bases de datos de este centro meteorológico.
- Datos del reanálisis **JRA-55**: set de datos que combina mediciones de alta calidad de satélites meteorológicos con predicciones de modelos numéricos de la **Japan Meteorological Agency (JMA)**. Los datos son brindados en línea por esta agencia meteorológica.

Para elegir los datos que se utilizarán en el proyecto se compararon las siguientes características: (1) la **resolución espacial**, que es la cantidad

de puntos sobre un plano en donde se obtienen mediciones de las tres componentes del viento; (2) la cantidad de **niveles de presión**, que es un indicador de cuántas mediciones se hacen a diferentes alturas en distintas capas de la atmósfera; y (3) la **resolución temporal**, que es la cantidad de mediciones que se hacen cada día y la antigüedad de los datos históricos.

El siguiente cuadro muestra un resumen comparativo de las características máximas de cada set de datos:



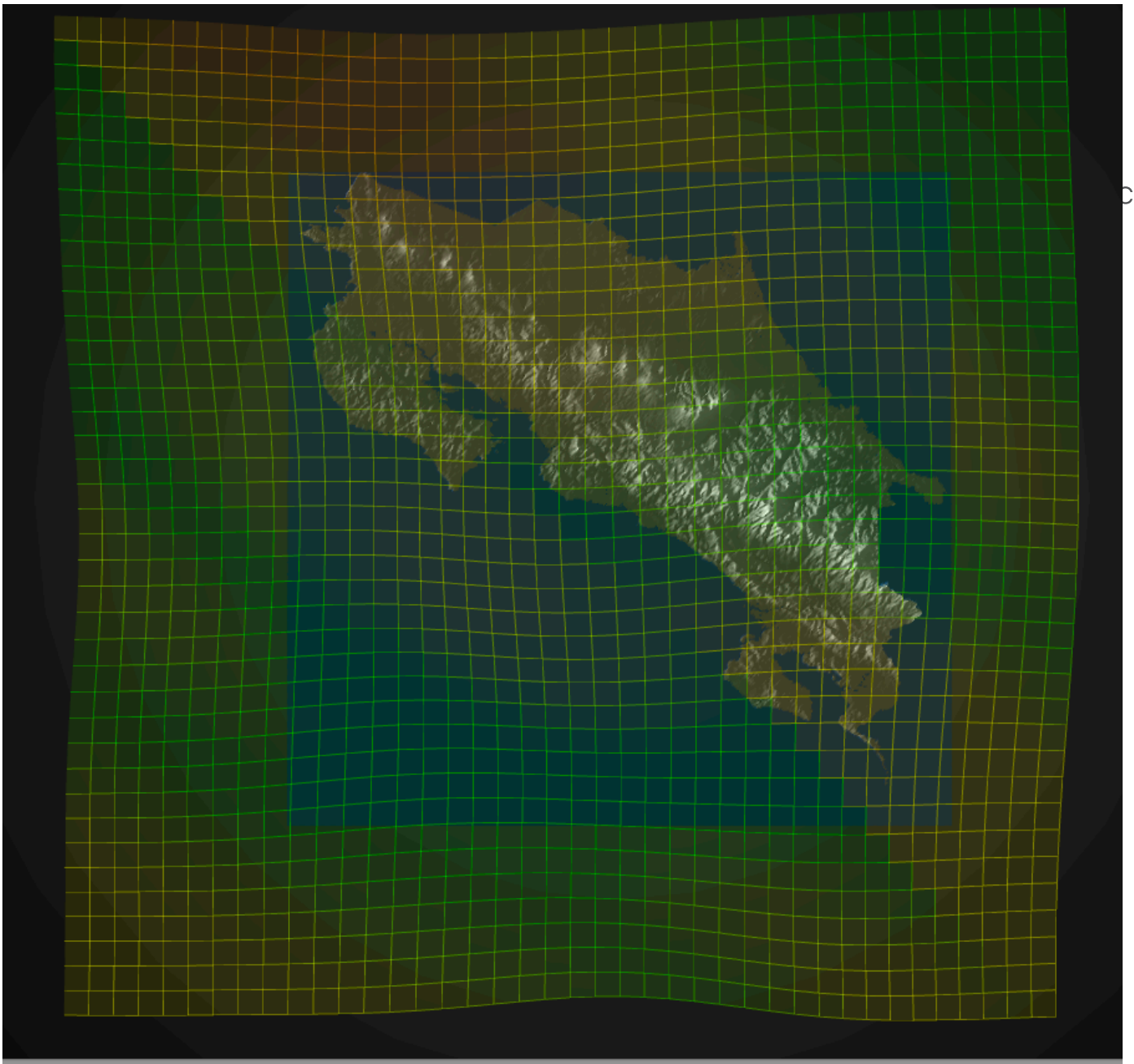
Set de datos	Resolución espacial	Niveles de presión	Resolución temporal
Datos del reanálisis NCEP/NCAR	2.5° x 2.5°	17 capas atmosféricas	4 veces al día desde 1948
Datos del reanálisis ERA-Interim	0.125° x 0.125°	37 capas atmosféricas	4 veces al día desde 1979
Datos del reanálisis JRA-55	1.25° x 1.25°	37 capas atmosféricas	8 veces al día desde 1955

Según la tabla anterior, el set de datos más apropiado para el proyecto del mapa visualización de vientos sobre Costa Rica es el brindado por el re-análisis **ERA-Interim del ECMWF**. La principal razón para elegir estas mediciones es su precisa **resolución espacial**. El territorio de Costa Rica no es muy amplio, entonces es muy importante tener una gran cantidad de mediciones en poco espacio para poder apreciar los fenómenos meteorológicos correctamente.

Se descargaron los datos de las componentes **zonal, meridional y vertical** del viento entre las **latitudes 5° Norte y 15° Norte y las longitudes 80° Oeste y 88° Oeste** (Figura 8). Esta región abarca completamente el territorio nacional terrestre y parte del territorio marítimo de Costa Rica. Al utilizar los datos de ERA-Interim se tienen aproximadamente 80 datos en latitud y 64 datos en longitud para crear la matriz de datos sobre el territorio, esto equivale aproximadamente a mediciones cada **14 km**.

Documentación acerca del re-análisis ERA-Interim:

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.828/full>



*Fig 8. Zona entre las latitudes 5° Norte y 15° Norte y las longitudes 80° Oeste y 88° Oeste mostrando un set de datos en forma de cuadrícula, interpretación iReal de los datos.*

### 3.3 Visualización de las velocidades y direcciones del viento

Teniendo el modelo geográfico listo, se prosiguió a visualizar los primeros datos de tiempo.

En primer instancia se estudiaron algunas visualizaciones de referencia entre las que cuenta la web windy (<https://www.windy.com>) o la de Google Google Brain team entre otras (<http://www.bewitched.com/windmap.html>) (figura 9).

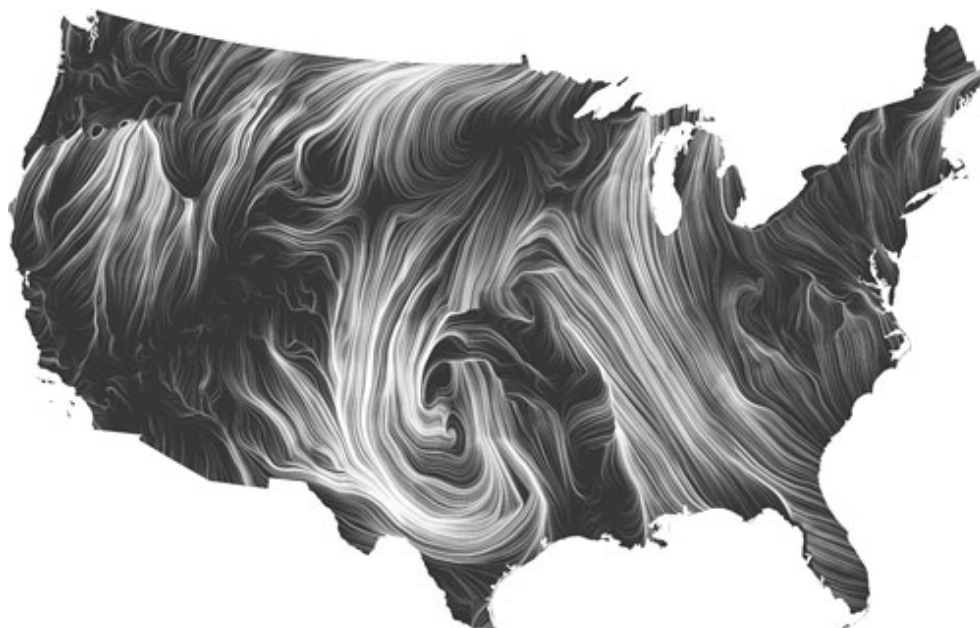
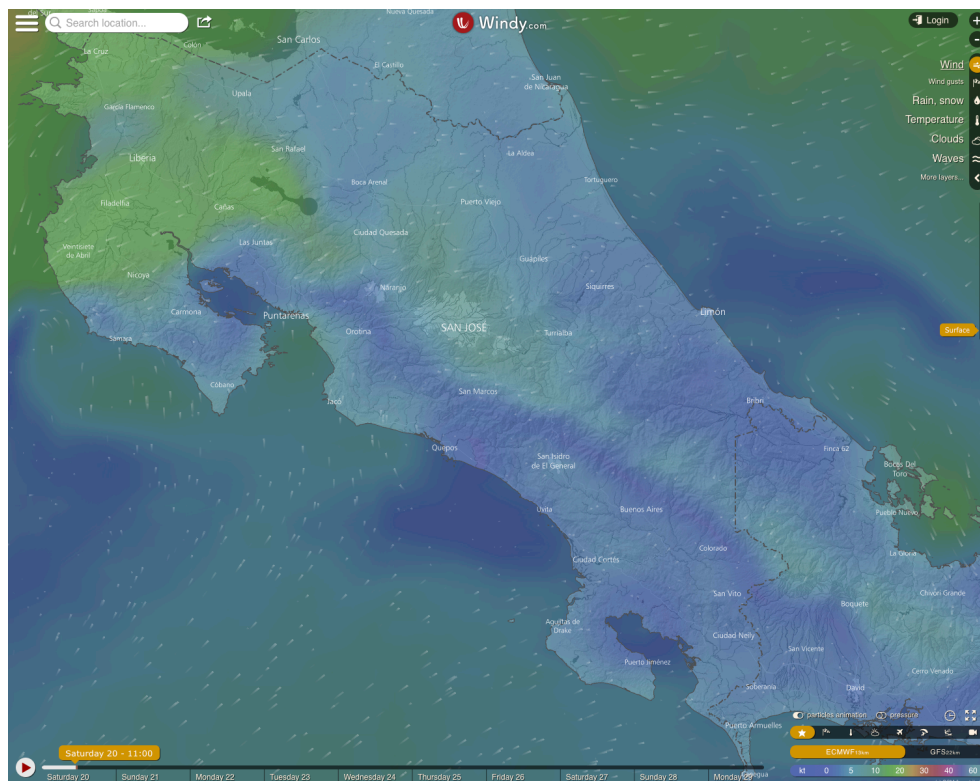
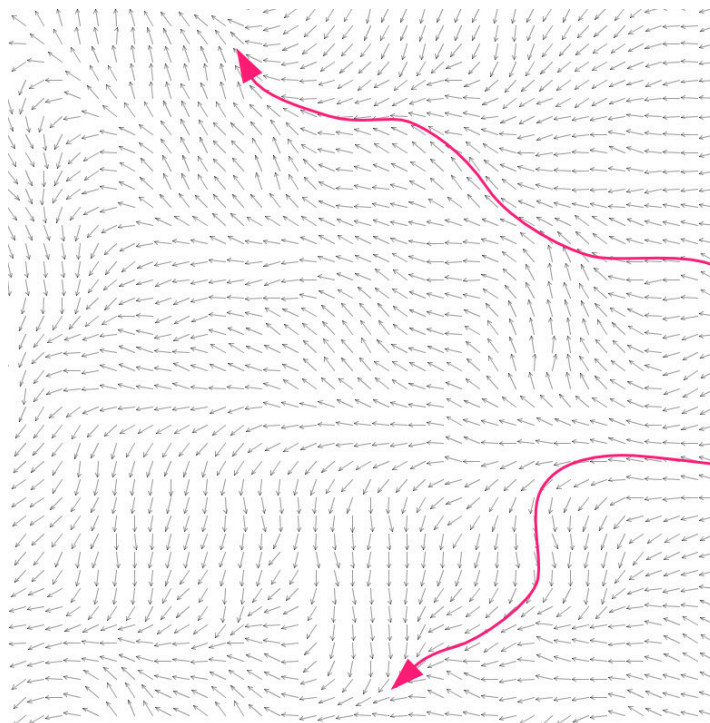


Fig 9. Ejemplos de visualizaciones de referencia.

Sin embargo no fue posible encontrar una visualización de vientos que muestre los datos en tres dimensiones, es decir, siempre se ve una capa a la vez, y generalmente la capa más cercana a la tierra. Sin embargo, el objetivo de skyGraph era visualizar los vientos en tres dimensiones dando especial interés a la influencia de la geografía en ellos. Aprovechando los recursos de iReal que ya se generaron en proyectos anteriores.

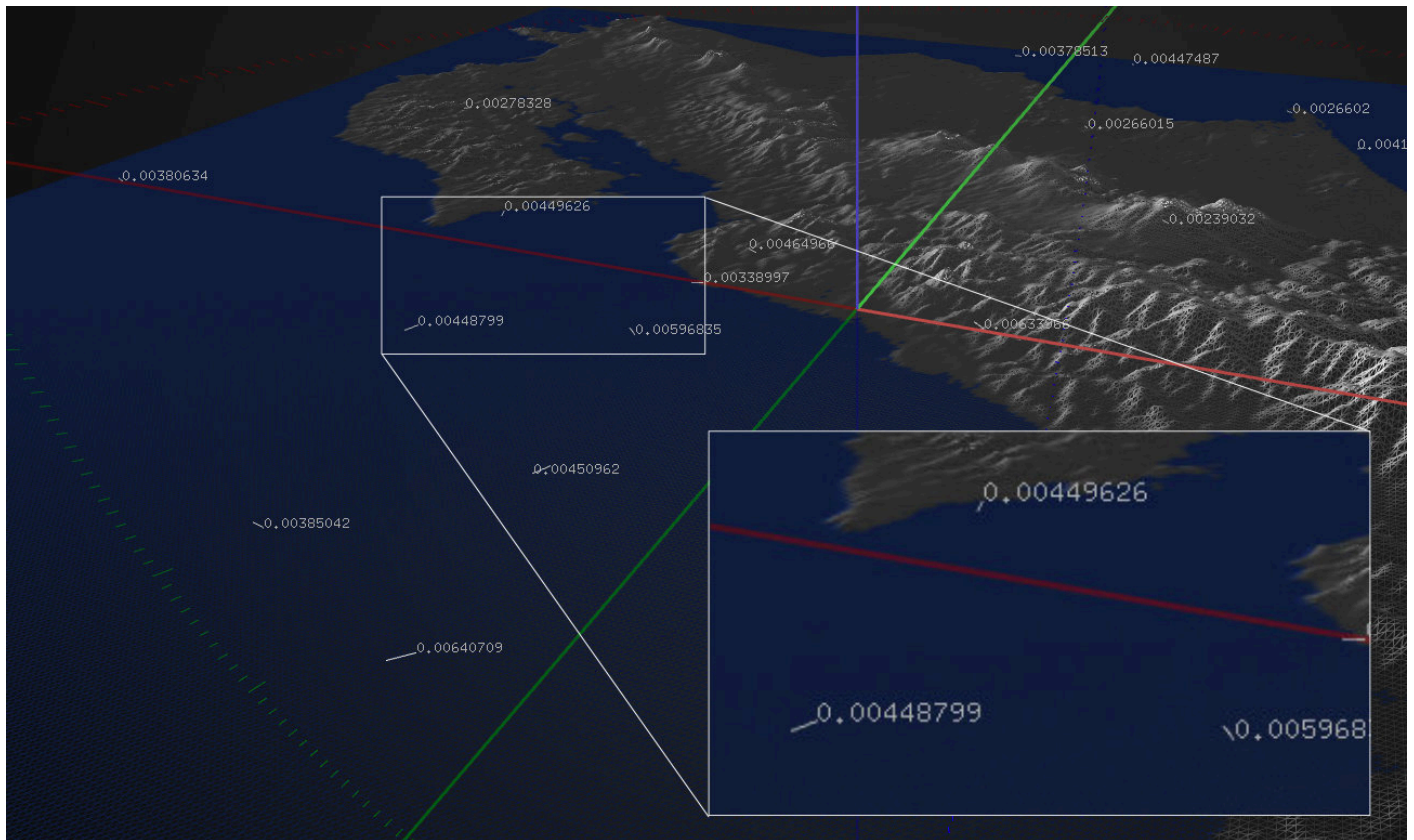
### 3.3.1 Automatas/boids

El primer intento que se hizo fue representar las fuerzas o velocidades de los vientos a través de “boids” (autómatas de baja inteligencia) que es una manera similar a la que se vio en el estado del arte. Estos autómatas leerían su posición y dirección de un campo de fuerzas (campo vectorial) que sería generado por los datos de los vientos. Con estos datos los autómatas recorrerían todo el campo moviéndose con dirección y velocidad asociadas a las fuerzas que representaban los vientos en esos cuadrantes específicos (Figura 10).



*Figura 10. Trayectorias seguidas por los boids al pasar por los campos vectoriales que representan las fuerzas de los vientos en cada zona geográfica.*

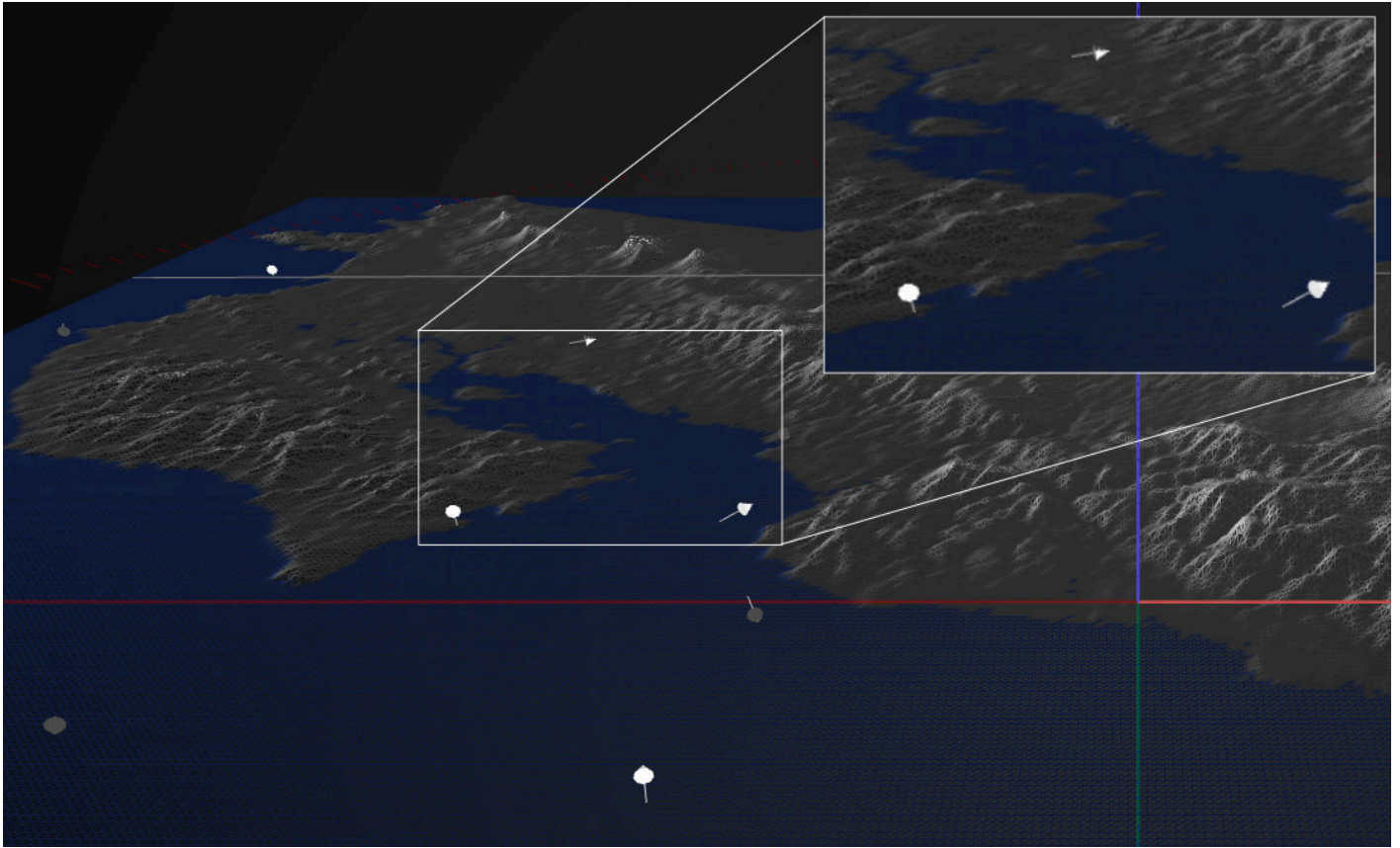
Con esta estrategia se procedió a representar por primera vez estos boids. La figura 11 muestra una imagen con esta primera representación en forma de líneas, donde la longitud de la línea corresponde a la velocidad del viento en ese punto geográfico, cada línea muestra (de manera explícita) su velocidad en ese momento para corroborar su comportamiento.



*Fig11 Visualización de Boids/Autómatas, en forma de líneas donde la longitud de la misma es correspondiente a la velocidad del viento en ese punto geográfico, cada flecha muestra su velocidad en ese momento para corroborar su comportamiento.*

A pesar de que las características de la flecha estaban definidas por las fuerzas que representan, era evidente que este tipo de representación no era suficiente para mostrar claramente la forma en que ese boid se movía tridimensionalmente a través de la geografía.

El siguiente paso fue intentar hacer más evidente la dirección de la flecha pues las tareas que requerían los científicos, incluían tener muy claro la dirección de las flechas en cada momento. Para esto se añadió una “cabeza” a cada flecha en forma de cono.



*Fig 11. Visualización de Boids/Autómatas, en forma de flechas, en este caso las puntas de las flechas son conos, lo que resultó un poco exhaustivo en tiempo de renderización.*

Los resultados son mejores a la representación anterior, sin embargo aun no suficientes para mostrar el movimiento en tres dimensiones.

Con esto sin resolver, se trabajo en agregar a las “cabezas”, “colas”, es decir, apéndices que se movieran claramente cuando los boids cambiaban de dirección, con la esperanza de que este movimiento dejara claro los cambios de dirección en forma tridimensional. Además se cambió el color de los boids codificando el color según la velocidad, es decir entre más rápido van, más rojos se ponen, siendo verdes los más lentos y amarillos los intermedios.



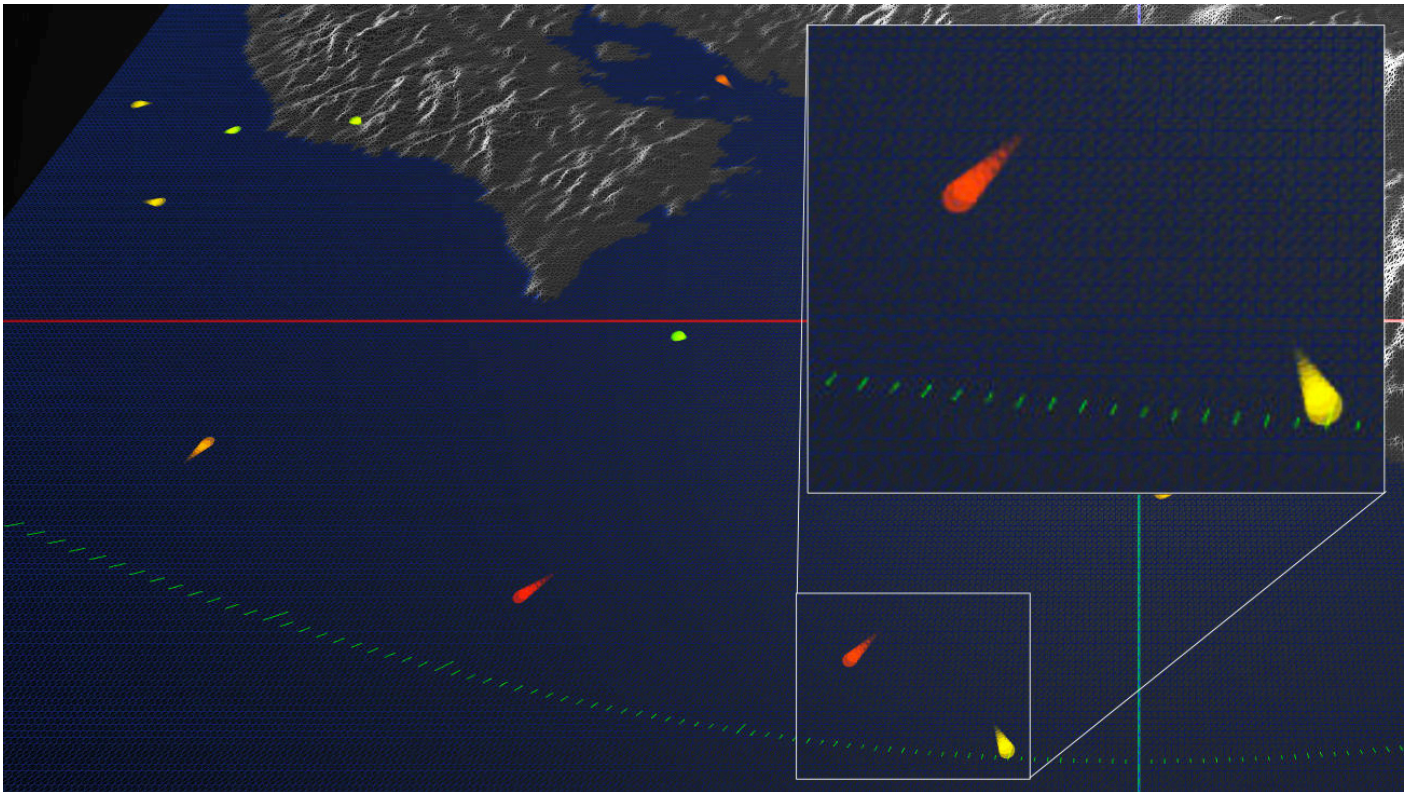


Fig 12. Visualización de Boids/Autómatas, en forma de elementos con “cola” y color.

Para lograr esto se investigó cuál sería la escala cromática adecuada, que definiera en primera instancia la velocidad del viento. Basados en el ecuador de Küppers [11] se definió cómo se deberían de “mover” los canales cromático **RGB** según el color deseado (figura 13).

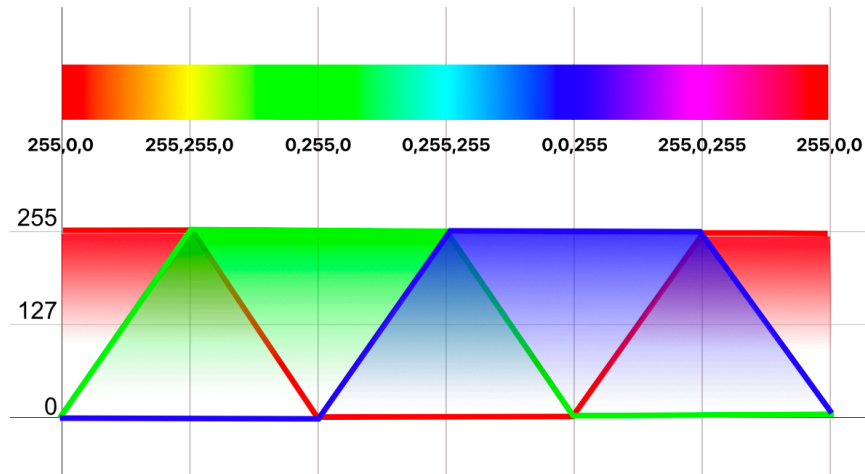


Fig 13. La figura (en su parte inferior) muestra los canales RGB y como oscilan entre 0 y 255 (el extremo inferior de la escala cromática parte de una intensidad (grado) de color mínima (nulo = par 0x00), pasa por una intensidad de color media (mediano = par 0x80 [128 decimal]) hasta llegar a una intensidad de color máxima (saturado = par 0xFF[255 decimal]) y en su parte superior el color resultante en cada combinación. Como es el ecuador toso los colores están en su máxima saturación sin variaciones de luminosidad ni de calidad

De esta teoría se seleccionó la gama ascendente (usada en la coloración de los autómatas) y la descendente usada en la coloración de la barra del dashboard de FPS (frame per second) como se muestra en la figura 14.

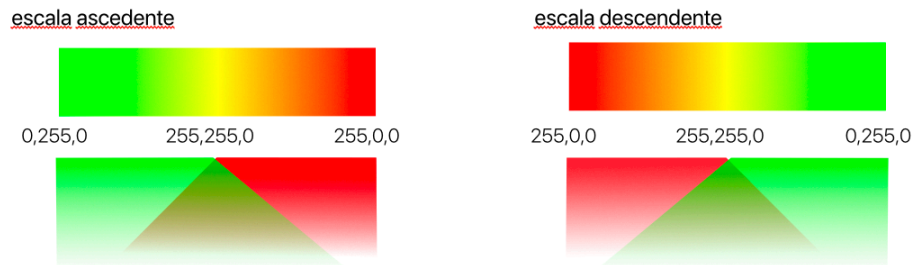


Fig 14. Mostrando la como se mueven los canales R y G en una escala ascendente usada para mostrar la velocidad de los vientos y una escala descendente usada para mostrar la eficiencia del sistema en FPS.

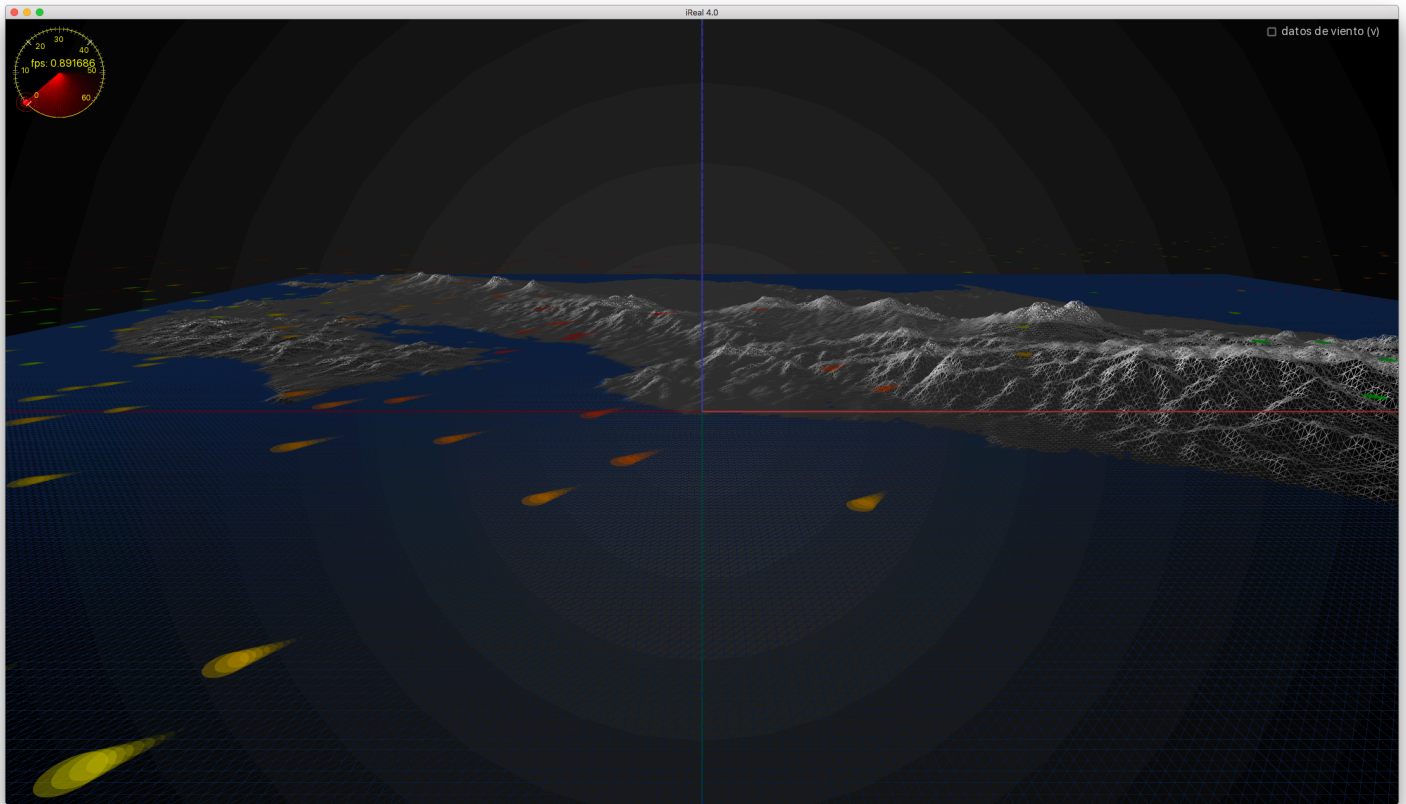


Fig 15. Autómatas y dashboard de eficiencia mostrando las escalas cromáticas propuestas.

### 3.3.2 Flechas en lugar de boids.

A este punto del proyecto se decidió, en conjunto con los científicos y el equipo de iReal, que este modelo no funciona bien para fuerzas en 3 dimensiones. Funciona muy bien en dos dimensiones, viendo los vientos desde arriba, pero cuando se desea saber si las fuerzas suben o bajan (una de las tareas primordiales para el dominio), este tipo de representación no logra dejar claro este movimiento. Los boids navegando por si mismos se mueven muy poco en el eje z y por lo tanto si su movimiento es ascendente o descendente era muy difícil de identificar.

Así que se cambio de enfoque por el de una matriz completa de flechas. En este nuevo enfoque las flechas siempre están en el mismo sitio y su magnitud y dirección se define en función de la fuerza del viento en ese cuadrante o campo vectorial. La figura 16 muestra un ejemplo de este enfoque.

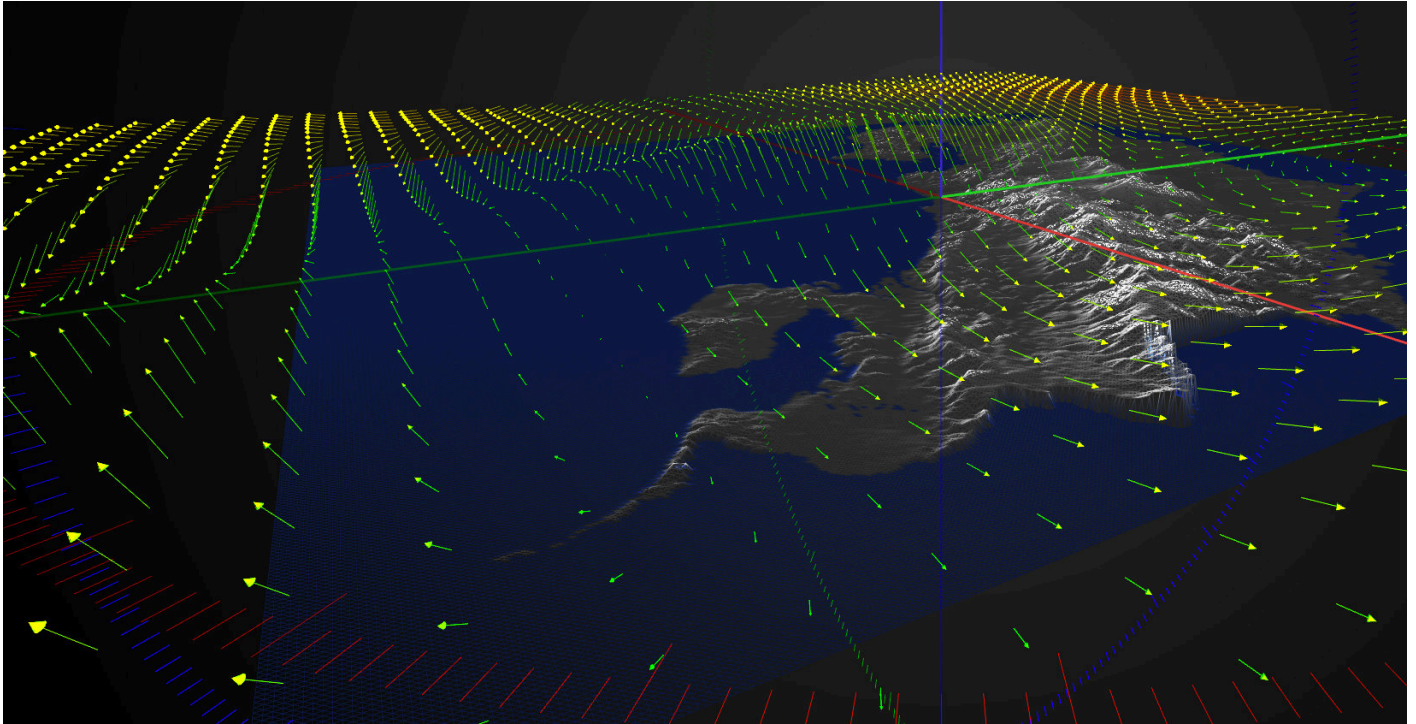


Figura 16. Visualización de las velocidades y direcciones del viento con flechas más largas y claras

En este intento se utilizó la escala cromática que se había definido en el apartado anterior. Como se ve en la figura 16, definitivamente los resultados son mejores que los anteriores. Se consultó de nuevo a los científicos que estuvieron de acuerdo con que era mejor, sin embargo, solo en flechas muy obvias de pendiente positiva o negativa se logra ver con facilidad las diferencias en los componentes “Z” de las direcciones del viento en cada sección. Con fuerzas/flechas pequeñas y cerca del  $Z = 0$  la definición de si la pendiente es positiva o negativa sigue siendo difícil.

### 3.3.3 Uso de planos en lugar de flechas, una geografía eólica.

Del enfoque anterior salió la idea de generar un plano curvo que mostrara esas “alturas” generando algo así como una “nueva geografía”, pero esta vez de los vientos. Ver figura 17.

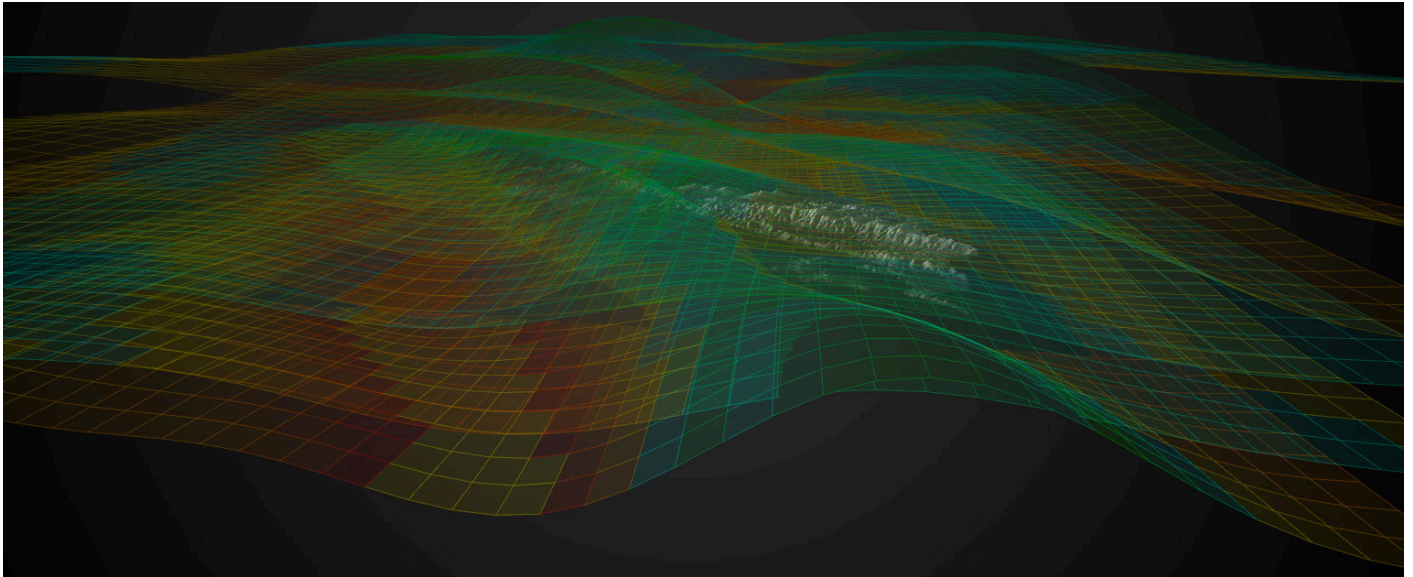


Fig 17. Propuesta donde un plano se curva según la dirección de las direcciones y velocidades del viento.

Como se ve en la figura 17, los “planos de vientos” también ayudan, sin embargo, se pierde el concepto de velocidad sacrificado por el de dirección, es decir, se ve mejor el componente “z” de las direcciones pero ya no se ve tan claro dónde el viento es más o menos veloz (la magnitud de la fuerza).

Lo que nos insinuó que tal vez un plano de base, en el “cero” de las velocidades podría funcionar.

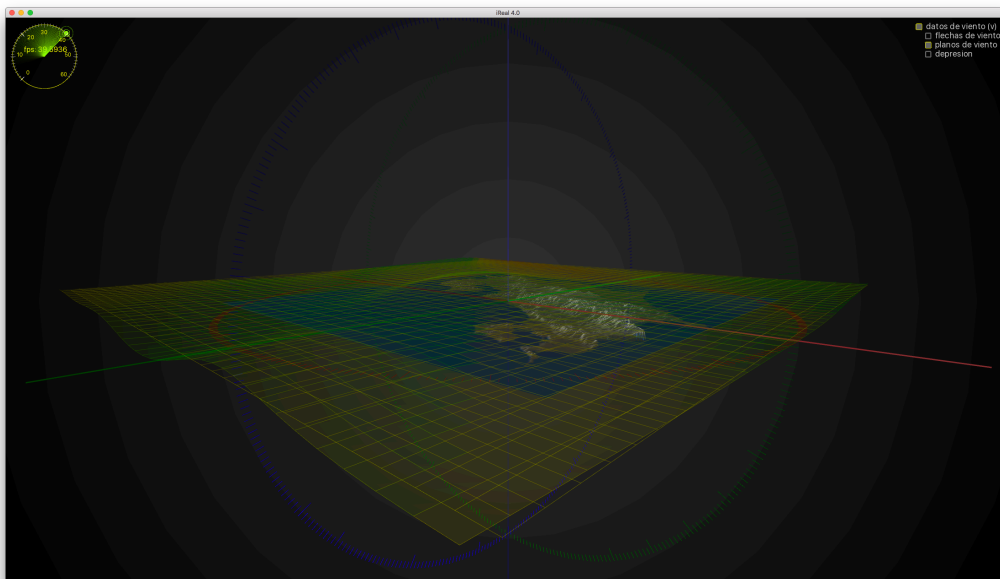
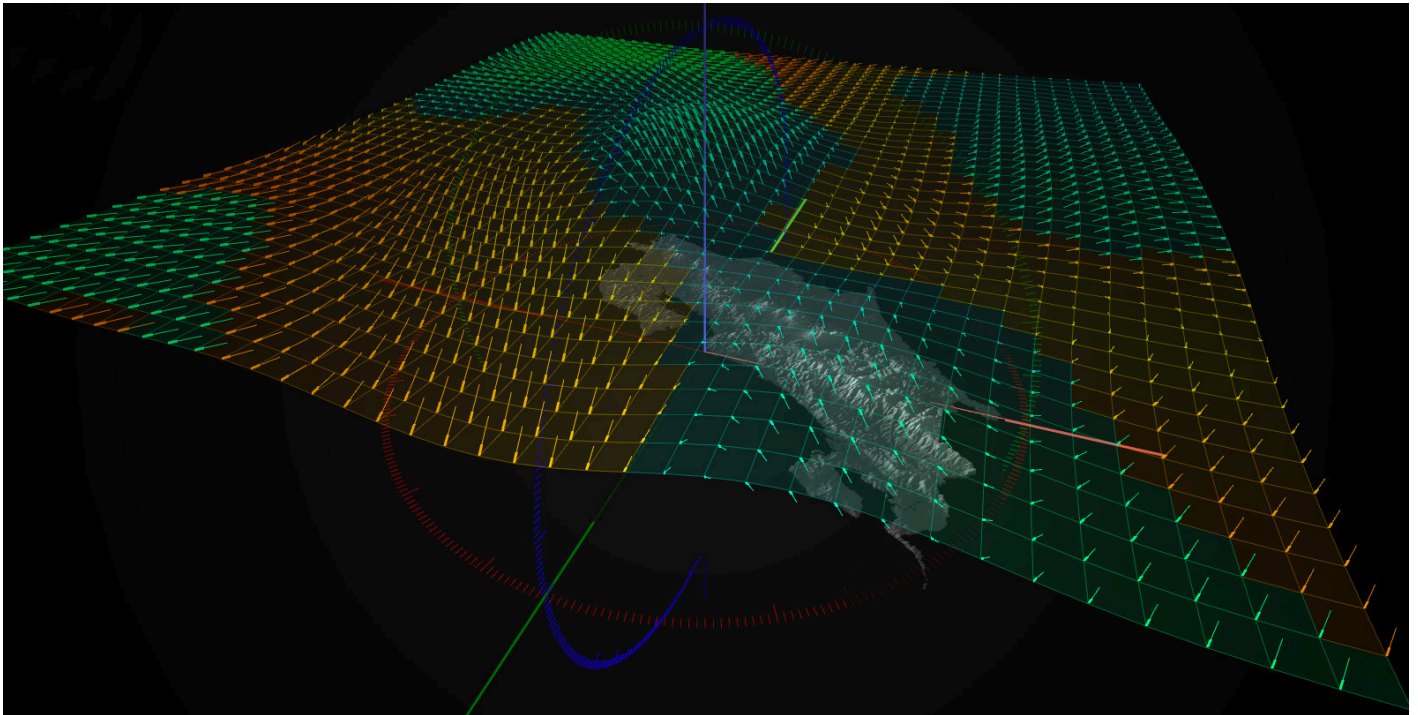


Fig 18. El mismo plano anterior pero con un plano de base para facilitar la comparación entre velocidades negativas y positivas en el eje “z”

Como se ve en la figura 18, el resultado no es mucho más claro que en la imagen anterior sin el plano de referencia, así que se volvió a la mesa de dibujo.

Esta vez, la respuesta obvia parecía ser la combinación del plano con las flechas, o sea la combinación de las propuestas de la figuras 16 y 17 juntas.



*Fig 19. Combinación de las propuestas del plano y las flechas.*

Definitivamente esta propuesta acusa mucho mejor la “geometría” de esa “geografía de vientos” ahora queda mucho más claro, como se mueven los vientos y su intensidad, sin embargo, la componente “z” de la dirección sigue siendo difícil de ver en la visualización en casos cercanos al cero.

### 3.3.4 Escalas cromáticas

Para tratar de dejar claro si el componente “Z” de la velocidad es negativo o positivo, se decidió probar con dos escalas cromáticas, una para las pendientes negativas y otra para las positivas.

Para diseñar esto se volvió al Ecuador de Küppers [10] [11], para definir cuáles serían las gamas más adecuadas para mostrar esta diferencia. Es decir, se necesitaba dos escalas que fueran claramente diferentes entre ellas y que además al interior de cada una se sintieran muy continuas.



En la figura 20 se ven 6 propuestas de gamas complementarias de color.

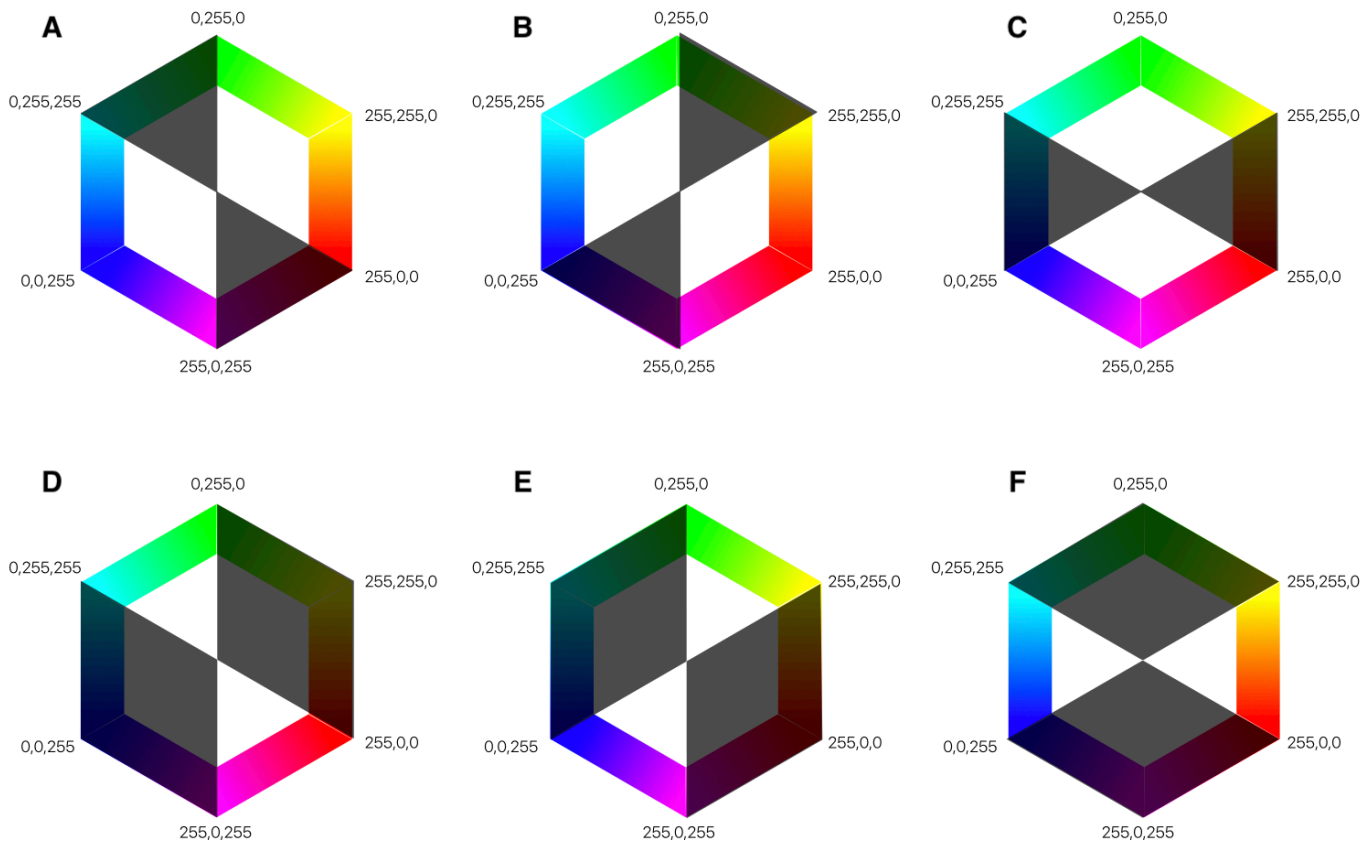


Fig 20. Paletas complementarias estudiadas para diferenciar entre las pendientes positivas y negativas de las fuerzas.

Se hicieron varias implementaciones con las escalas cromáticas y finalmente se decidió por las escalas mostradas en la composición A de la figura. Las razones por las que se prefirió esta opción fueron tres, (1) entre las dos propuestas es fácil diferenciar sin error si un color pertenece a una u otra escala, (2) los colores en cada paleta son bastante suaves en su degradación con lo que queda claro cuál es más intenso y cuál menos y (3) es posible hacer una asociación semántica entre “buen tiempo” la escala verde-amarillo y “mal tiempo” la escala azul-violeta.

Esta última característica también fue pedida por parte de los científicos, pues en general vientos con pendientes positivas tienden a generar lluvias y vientos con pendientes negativas tiende a generar días soleados, son las llamadas zonas de baja presión (las pendientes ascendentes) y zonas de alta presión las descendientes.

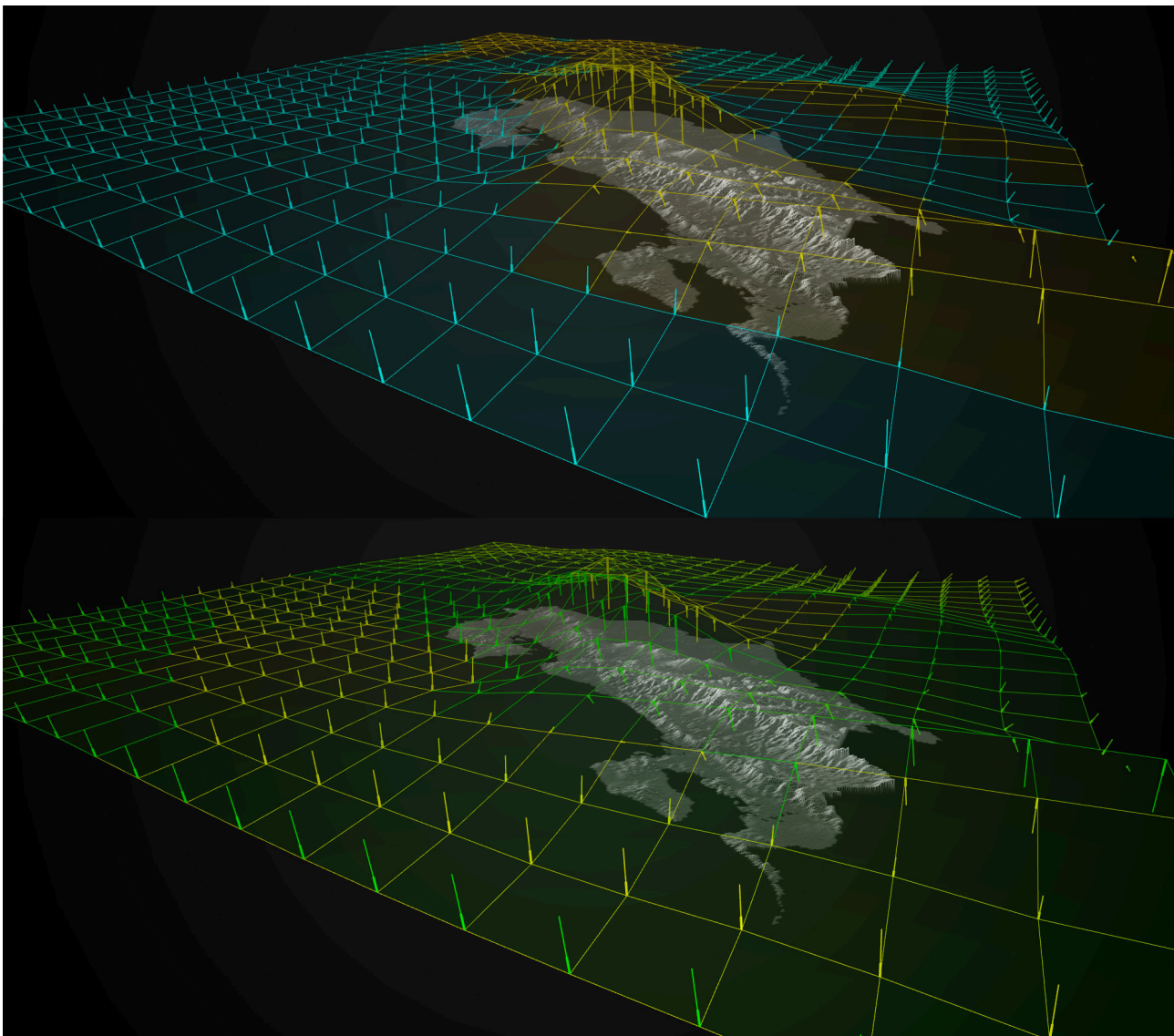


Figura 21. El mismo set de datos usando las dos escalas cromáticas ensayadas.



En la figura 21 se puede ver esta diferencia con claridad. En la parte superior de la figura se ve la nueva codificación cromática con dos escalas una para las pendientes ascendentes y otra para las descendientes. En la parte abajo de la figura se ve la escala implementada anteriormente que solo codifica las magnitudes de las fuerzas.

En la parte superior con las nuevas escalas se ven claramente tres zonas separadas por sus tonos azules (hacia abajo) y los tonos amarillos (hacia arriba). En la parte inferior de la figura, en cambio, se ve el mismo set de datos pero con una sola escala, y no es posible diferenciar con claridad las pendientes.

### 3.3.5. Animación

En el paso anterior se adelantó mucho con respecto a dar una solución a las tareas que los científicos habían pedido:

- Observar el comportamiento de las magnitudes de las fuerzas en el tiempo y espacio.
- Saber con exactitud si estas fuerzas son ascendentes o descendientes.
- La posible influencia de una capa en la siguiente.

Sin embargo cuando hay varias capas juntas aun no es fácil ver como influye una capa en la otra, o la geografía, para eso se implementaron dos estrategias más.

La primera fue animar las flechas, siguiendo un poco la idea inicial de los boids, que se movían a través de todo el territorio, solo que esta vez aplicada a las flechas. En este caso, cada flecha crecería desde su punto inicial a su punto final acentuando aun más la dirección y magnitud con la que se mueve, la figura 22 muestra tres momentos en esta animación. La segunda estrategia "perfiles de datos" se explica más adelante.

Con todo esto se procedió a validar estas propuestas con un grupo de meteorólogos del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) de la Universidad de Costa Rica, con el fin de ir enfocando la investigación a las necesidades del dominio.

En este caso la evaluación de los científicos fue muy positiva, ahora si es posible ver las dos características de las fuerzas de los vientos (dirección y magnitud) de un modo claro.

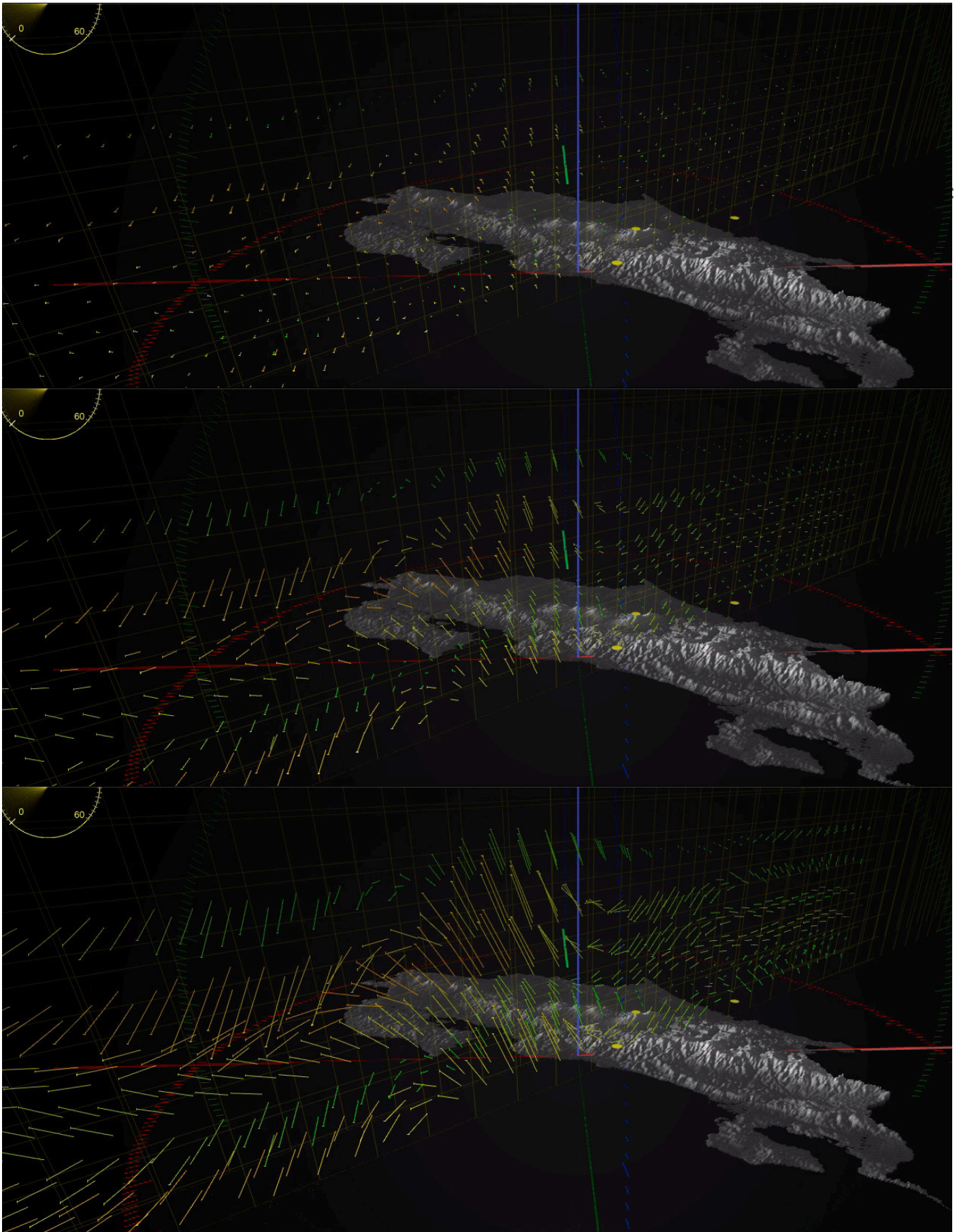


Fig 22. imágenes mostrando en tres pasos la animación de las flechas.

## 4. Resultados

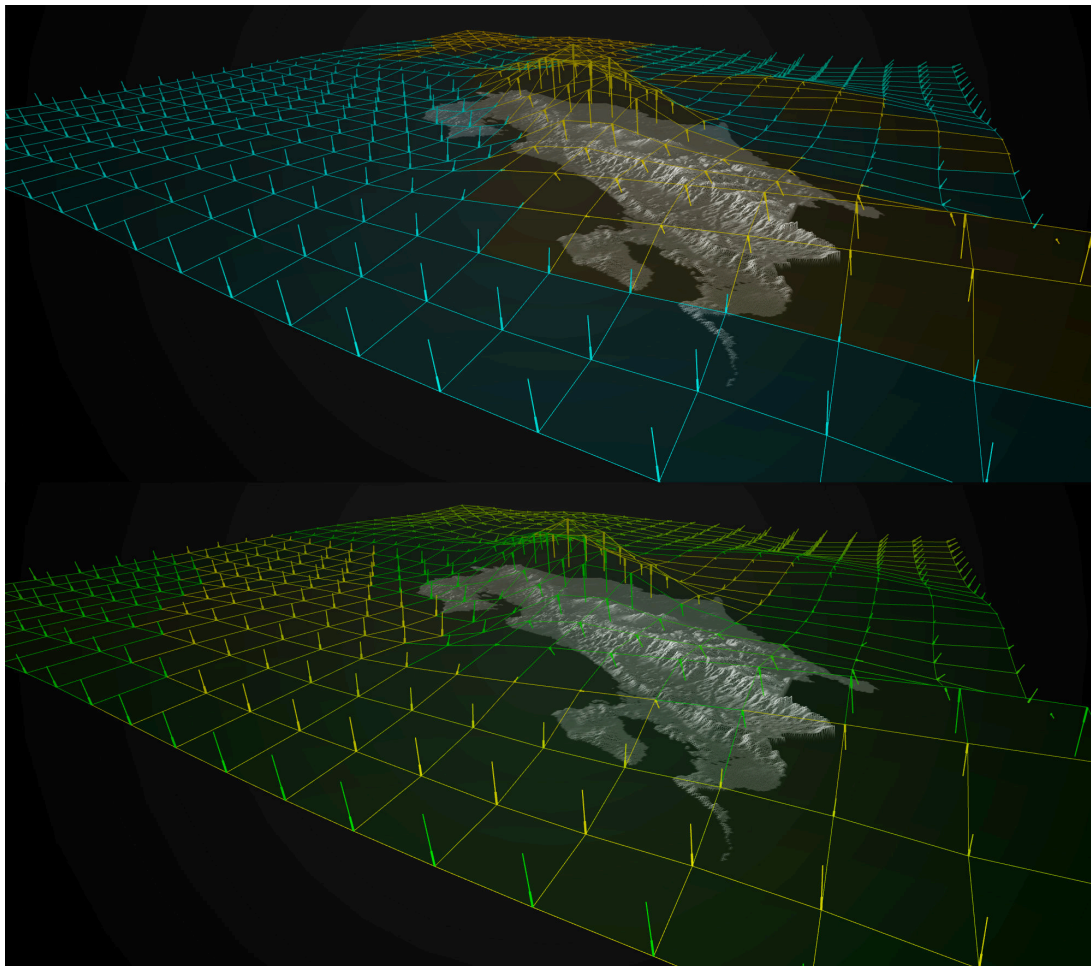
En investigaciones de tipo tecnológico, el resultado es el sistema funcionando, el sistema funciona perfectamente con los requerimientos que se establecieron al inicio del proyecto.



### 4.1. Diseño de la visualización

Como se dijo, el principal reto fue mostrar en 3D la fuerza del viento tanto en magnitud como dirección. Como no encontramos referencias en 3D, se terminó desarrollando todo un sistema, como se explicó antes, cuyas conclusiones permiten al usuario dos cosas principales:

1. dar al usuario la posibilidad de cambiar el color en dos escalas diferentes, una para mostrar si la fuerza sube o baja y otra para mostrar la intensidad. (ver figura 23).



*Fig 23. imágenes mostrando los mismos datos con las dos escalas de color, distinguiendo que las zonas de ascensión son más difícil de ver en una escala que en otra.*

2. animar las flechas para hacer evidente la dirección de las fuerzas (figura 22).

#### 4.1.1 Perfiles

Descubrimos esta técnica en un proyecto anterior [12], donde los geólogos la utilizan muy a menudo para obtener datos sísmológicos. Se trata de definir perfiles en los datos para poder evitar ver todo al mismo tiempo y concentrarse en una zona específica.

En este conjunto de datos tenemos al menos once capas de viento diferentes, cada una de ellas con una matriz de fuerzas de 41x41, que muestran las velocidades y direcciones del viento. Cuando todos ellos están juntos en la pantalla, es complicado entender cómo una capa influye en la siguiente, y cómo todo el sistema está influenciado por las montañas. Así que aplicamos nuestro enfoque de "Perfil Sísmico" con resultados sobresalientes. Pudimos aislar la zona de datos deseada y analizarla en cada ángulo 3D. (ver Figura 24).

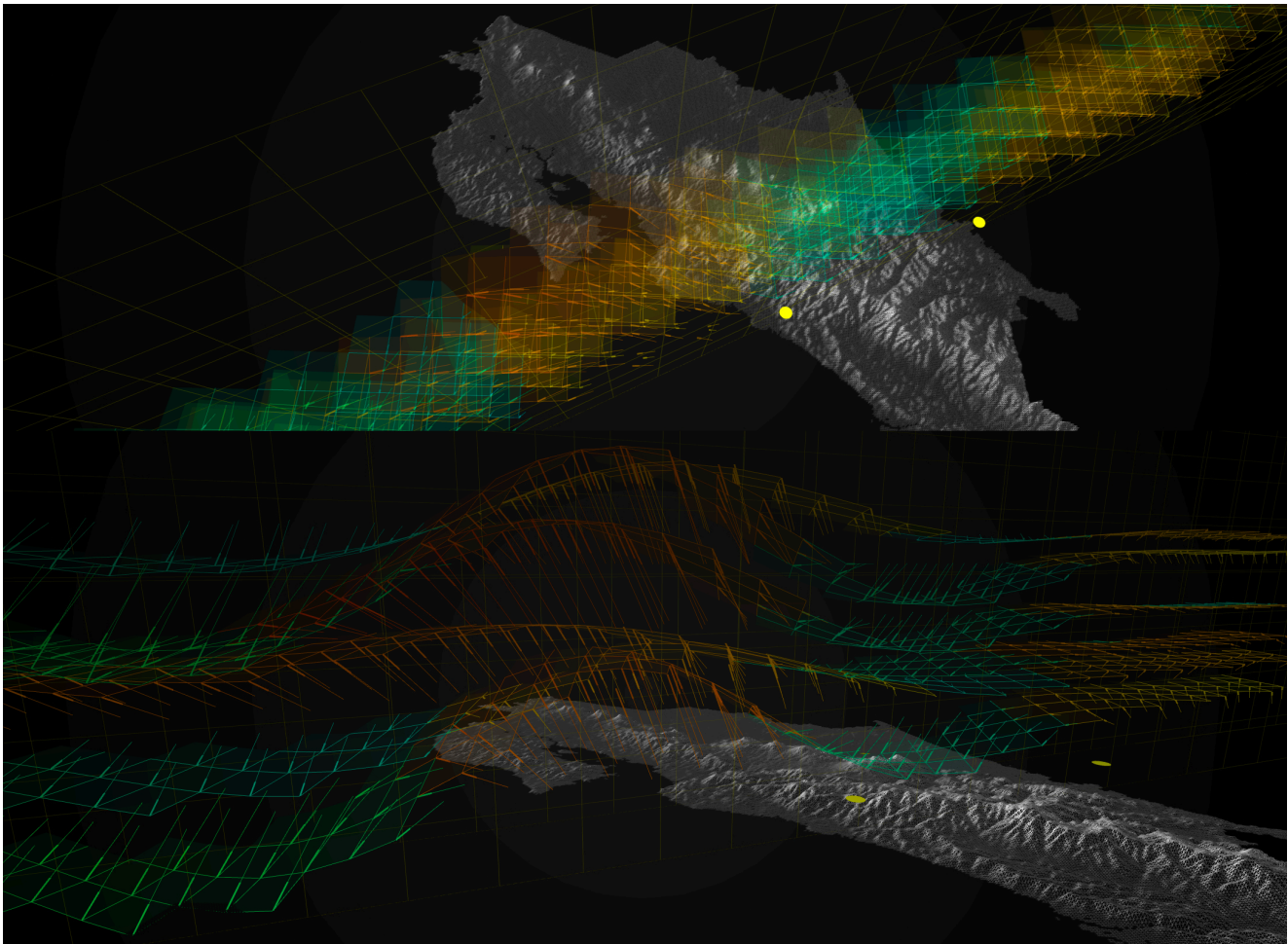


Fig 24. imágenes mostrando un perfil de vientos con varias capas isobáricas y la influencia de las montañas de Costa Rica.

#### 4.1.2 Opacidad

Por supuesto, no sabemos previamente, cuantas capas isobáricas quiere visualizar el usuario al mismo tiempo, o si quiere ver las capas con o sin flechas, planos o animaciones; por ello, la cantidad de datos en pantalla puede ser muy variable.

En la prueba de usuario, descubrimos que era necesario tener un valor variable para la opacidad en la que se visualizan los datos. Para responder a esta necesidad, añadimos un "deslizador" que controla la transparencia de todos los datos. (ver figura 25).

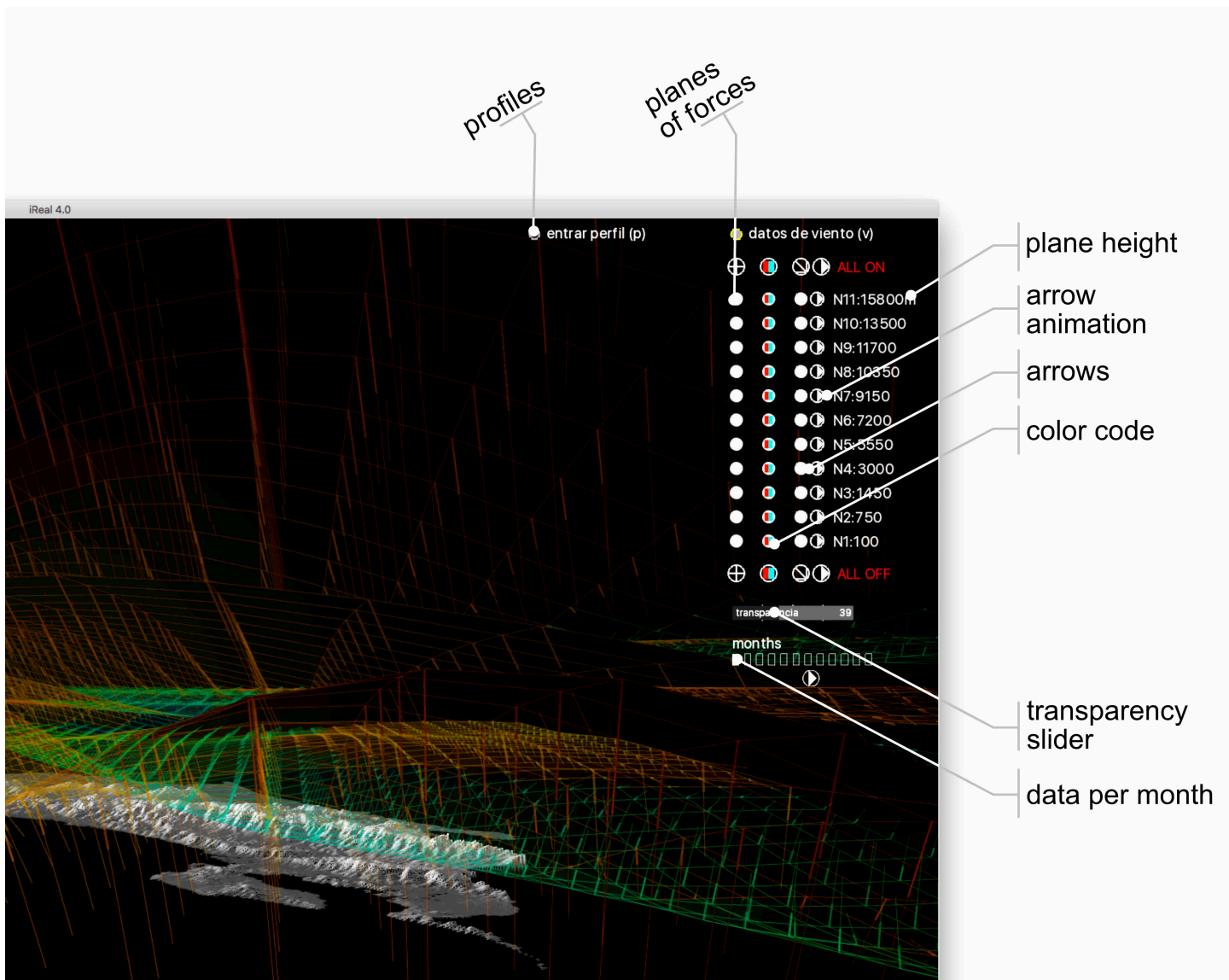


Fig 25. Interface diseñada para skyGraph.

### 4.1.3 Animación de los datos entre meses

Debido a que tenemos datos de 12 meses, cada uno de ellos con todos los niveles y fuerzas, los científicos querían ver una animación entre meses.

Para ello, diseñamos una línea con 12 botones y un "botón de reproducción" para que el usuario pueda ver un mes de su elección, o "reproducir" todo el año, viendo el desarrollo de los datos entre meses (ver figura 25).



### 4.2. Evaluación de la usabilidad:

Todo el proceso de desarrollo de skyGraph estuvo siempre en contacto con los científicos del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) de la Universidad de Costa Rica. Celebramos varias reuniones para alinear las decisiones de diseño con las necesidades de los científicos (figura 26). El resultado fue que toda la herramienta responde a la retroalimentación de los usuarios, asegurando que les será útil.



Fig 26. Sesiones de trabajo en el CIGEFI.

Desde el inicio del proyecto, se quiso dar la posibilidad de ver los datos en 3 dimensiones, posibilidad que los científicos no tenían antes. Con los resultados, los científicos no sólo pueden ver los datos en 3D sino también, ver perfiles geográficos de los datos y animarlos entre meses.

Al presentar los resultados a los científicos, la mayoría de ellos encontraron la herramienta muy intuitiva y útil, e incluso quieren profundizarla con datos más específicos para investigaciones definidas.

El trabajo realizado durante los últimos años en el tema de visualización científica, a convertido al grupo iReal, en un grupo con experticia y visión en esta temática. Así lo demuestra su hoja de ruta, cuando señalaba que después de realizar proyectos de investigación de carácter interno, el 2014 era el inicio para trabajar con datos de alguna institución que tuviese la necesidad de visualizar y que de alguna forma esto permitiera que el

grupo iReal contribuyera a resolver dicha necesidad e hiciera un aporte a la sociedad costarricense. La alianza con el OVSICORI ha sido una decisión acertada y nos encamina a seguir trabajando juntos, pero además de buscar nuevos retos. Retos que también están escritos en la hoja de ruta y nos llevó a establecer un trabajo conjunto con la Agencia Espacial Alemana (DLR).



## 5. Discusión y conclusiones

El Objetivo General del proyecto fue: “Desarrollar una visualización del movimiento de los vientos en el país con filtros de tiempos y altura.”

El proyecto no solo cumplió su objetivo sino que fue más allá al adicionar herramientas que no estaban previstas como la animación de los datos durante todo un año y la posibilidad de observar los datos en zonas específicas a partir de los perfiles de datos.

El grupo de científicos del CIGEFI se mostraron muy satisfechos por el modo en que la herramienta los puede ayudar al análisis de datos en su trabajo diario.

De la iniciativa se han propuesto muchas otras ideas para continuar ayudando a entender mejor los datos del clima. El siguiente proyecto, ya en marcha, será la visualización de la trayectoria de todos los huracanes de la Cuenca del Caribe en los últimos 30 años, correlacionando los datos con las zonas de precipitaciones más fuertes en las mismas fechas.

El grupo iReal se siente muy complacido de poder seguir contribuyendo a la comunidad científica del país con herramientas que contribuyan con su trabajo y por lo tanto a una mayor comprensión del comportamiento de nuestro país en aspectos tan importantes como el clima o la actividad sísmica.

## 6. Bibliografía

- [1] Instituto Meteorológico Nacional. (2008). *Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. Comité Regional de Recursos Hidráulicos, Costa Rica.
- [2] Scientific Visualization Journal. (2018). Editorial. Recuperado de <http://sv-journal.org>
- [3] Garmentía, J. (1970). La circulación general de la atmósfera y otros problemas de la Física. Universidad de Salamanca, España.
- [4] Met Office. (2014). *Global circulation patterns*. Recuperado de <http://www.metoffice.gov.uk/learning/learn-about-the-weather/how-weather-works/global-circulation-patterns>
- [5] Taylor, M. A., & Alfaro, E. J. (2005). Central America and the Caribbean, climate of. *Encyclopedia of world climatology*, 183–189.
- [6] Holton, J. (2004). *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Elsevier Academic Press, Estados Unidos.
- [7] Dee, D., et al. (2014). Toward a Consistent Reanalysis of the Climate System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95, 8, 1235–1248.
- [8] Instituto Meteorológico Nacional. (2018). *Boletín Meteorológico Mensual*. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/454290/MAYO>.
- [9] Kalnay, E., et al. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 3, 437-472.
- [10] Hernández-Castro, F., & Monge-Fallas, J. (2016). Visualizador 3D de la geografía de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(8), 77-85.
- [11] Kúppers, H. (1995) Fundamentos de la teoría de los colores, 5a. Ed. Ed. GG., México.
- [12] Hernández-Castro, F. (2016). Teoría del color (ingredients). Escuela de Diseño Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.



[12] Hernandez-Castro, F. Monge-Fallas, J. (2018). An Intuitive 3D Interface for Defining Seismic Profiles by Plinius. PONTE: International Scientific Researches Journal, 74(4).

