



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Efectos del viento sobre  
paneles fotovoltaicos  
montados en cubierta de una  
edificación baja de dos  
aguas: estudio experimental**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Gonzalo López Guerra

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Adrián Pozos Estrada



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

# *Dedicatoria*

*A mi hija, esposa, madre, padre y hermano.*

# *Agradecimientos*

*Agradezco al Grupo de Ingeniería de Viento (GIV) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM), por todo su apoyo y sabiduría.*

*Agradezco el apoyo económico provisto a través del proyecto “Efectos del viento en edificios bajos y altos” con No. IN101318 del fondo PAPIIT, DGAPA, UNAM. También agradezco al IIUNAM por la disposición del túnel de viento para la realización de las pruebas experimentales.*

*Agradezco especialmente a mi asesor el Dr. Adrián Pozos Estrada por su paciencia y apoyo en este trabajo.*

## **Resumen**

*Se realizan estudios experimentales en el túnel de viento de capa límite atmosférica, operado por el Grupo de Ingeniería de Viento del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con la finalidad de estudiar la distribución de presiones sobre paneles fotovoltaicos montados en la cubierta de una edificación baja de dos aguas. Este tipo de configuración no está contemplada en la normatividad actual. Con base en las presiones registradas, se calculan coeficientes de presión neta, útiles para el diseño del soporte de los paneles.*

## **Abstract**

*Wind tunnel test in a boundary layer wind tunnel operated by the Group of Wind Engineering of the Institute of UNAM are carried out with the aim of studying the wind pressure distribution over photovoltaic panels mounted on the roof of a low-rise buildings with gable roof. This type of configuration is not included in the current Mexican design wind code or standard. Based on the registered wind pressures, net pressure coefficients are calculated, these coefficients are useful for the design of the support structure of the photovoltaic panels.*

## **Objetivos**

*Obtener, la distribución de presiones sobre los paneles fotovoltaicos montados en la cubierta de una edificación baja de dos aguas, mediante pruebas experimentales en túnel de viento de capa límite atmosférica.*

*Determinar y proponer coeficientes de presión neta sobre los paneles fotovoltaicos, que puedan ser empleados en el diseño del soporte de este tipo de elementos.*

## Índice

<b>RESUMEN</b> .....	4
<b>ABSTRACT</b> .....	4
<b>OBJETIVOS</b> .....	5
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	8
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES</b> .....	9
1.1    LA NECESIDAD DEL EMPLEO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN LA ACTUALIDAD .....	9
1.2    LA ENERGÍA SOLAR Y LOS PANELES FOTOVOLTAICOS EN EL TIEMPO .....	11
<b>CAPÍTULO 2. EMPLEO DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN LAS EDIFICACIONES</b> .....	13
2.1    CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS .....	13
2.2    CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS EDIFICACIONES CON EMPLEO DE PANELES FOTOVOLTAICOS .....	16
2.3    COMPONENTES DEL SISTEMA EDIFICACIÓN-PANEL .....	18
2.4    ÁNGULO DE INCLINACIÓN “ $\beta$ ” .....	21
2.5    ¿CUÁNTOS PANELES FOTOVOLTAICOS EMPLEAR? .....	26
<b>CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL MODELO EMPLEADO EN EL ESTUDIO EN TÚNEL DE VIENTO</b> .....	30
3.1    CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE EDIFICACIÓN BAJA .....	30
3.2    DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DE INCORPORACIÓN DEL MODELO DE PANEL FOTOVOLTAICO EN EL MODELO DE EDIFICACIÓN BAJA .....	31
3.3    ELECCIÓN DEL MATERIAL Y CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS .....	32
3.4    PARÁMETROS DE SIMILITUD.....	39
3.5    PROTOCOLO DE LAS PRUEBAS.....	41
<b>CAPÍTULO 4. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN, RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	44
4.1    PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA AMBAS SIMULACIONES DE CATEGORÍA DE TERRENO .....	44
4.2    RESULTADOS DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL .....	49
4.2.1 Resultados de la simulación de terreno categoría 1.....	50
4.2.2 Resultados de la simulación de terreno categoría 4.....	57
4.2.3 Resumen de los coeficientes de presión neta obtenidos.....	65
4.3    ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	68
5.1    CONCLUSIONES.....	68
5.2    RECOMENDACIONES .....	68
<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA</b> .....	70
<b>APÉNDICE A. MAPAS DE COEFICIENTES DE PRESIÓN NETA, VALORES MEDIOS (<math>C_{PN\_M}</math>), TERRENO CATEGORÍA 1</b> .....	73
<b>APÉNDICE B. MAPAS DE COEFICIENTES DE PRESIÓN NETA, VALORES PICOS MÁXIMOS (<math>C_{PN\_P\_MAX}</math>), TERRENO CATEGORÍA 1</b> .....	80
<b>APÉNDICE C. MAPAS DE COEFICIENTES DE PRESIÓN NETA, VALORES PICOS MÍNIMOS (<math>C_{PN\_P\_MIN}</math>), TERRENO CATEGORÍA 1</b> .....	87
<b>APÉNDICE D. MAPAS DE COEFICIENTES DE PRESIÓN NETA, VALORES MEDIOS (<math>C_{PN\_M}</math>), TERRENO CATEGORÍA 4</b> .....	94
<b>APÉNDICE E. MAPAS DE COEFICIENTES DE PRESIÓN NETA, VALORES PICOS MÁXIMOS (<math>C_{PN\_P\_MAX}</math>), TERRENO CATEGORÍA 4</b> .....	101

**APÉNDICE F. MAPAS DE COEFICIENTES DE PRESIÓN NETA, VALORES PICOS MÍNIMOS ( $C_{PN\_PMIN}$ ), TERRENO**  
**CATEGORÍA 4 .....108**

## **Introducción**

*Existen diferentes maneras de generación de energía eléctrica, dentro de ellas se encuentran los paneles fotovoltaicos, una manera de generar energía limpia y renovable. Esta forma de generación de energía eléctrica puede ser utilizada en las edificaciones civiles, para satisfacer parcial o totalmente las necesidades energéticas de la edificación.*

*En la actualidad, la forma más común de incorporar estos elementos a las edificaciones es en la cubierta; sin embargo, debe tenerse especial cuidado con los efectos generados por el viento, los cuales pueden provocar pérdidas parciales o totales.*

*Debido a esto, nace la necesidad de realizar pruebas experimentales que permitan conocer su comportamiento y a su vez determinar coeficientes de presión neta que ayuden a su diseño.*

*El Capítulo 1 presenta aspectos generales de la energía solar como energía renovable y el aprovechamiento de ésta con el empleo de paneles fotovoltaicos.*

*Las características de diversos paneles fotovoltaicos y su empleo en las edificaciones se presentan en el Capítulo 2. Los detalles de la selección de la inclinación y orientación de los paneles fotovoltaicos para tener un mejor aprovechamiento también se presentan en este capítulo.*

*El Capítulo 3 describe el proceso de diseño, construcción, instrumentación y pruebas experimentales en túnel de viento de los paneles fotovoltaicos.*

*El análisis de resultados de las pruebas experimentales se presenta en el Capítulo 4.*

*Finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas al finalizar el presente estudio.*



## **Capítulo 1. Antecedentes**

### **1.1 La necesidad del empleo de energías renovables en la actualidad**

*Con el descubrimiento del fuego, la humanidad adquirió una necesidad energética para satisfacer sus actividades cotidianas. Esta necesidad energética ha aumentado con el paso de los años debido a tres factores fundamentales: el crecimiento de la población, el desarrollo económico y el progreso tecnológico. Entre estos factores, principalmente el progreso tecnológico, dieron auge a la revolución industrial en la cual se generaron cambios radicales en el empleo de los recursos energéticos, como los citados a continuación:*

- *Con la creación de la máquina de vapor se generó una transición entre el empleo de un recurso energético natural (la leña) a uno fósil (el carbón), debido a que la energía calorífica liberada resulta ser mayor y por consecuencia la generación de energía mecánica (movimiento) también.*
- *Posteriormente es creado el motor de combustión interna cuya ventaja respecto a la máquina de vapor es la de no requerir agua para su funcionamiento, pero al ser necesaria una explosión controlada dentro del sistema se requirió utilizar un recurso energético que fuese capaz de hacerlo, por lo que con el paso del tiempo se empleó y se sigue empleando gasolina, un recurso energético fósil derivado del petróleo.*
- *A la par del desarrollo del motor de combustión interna, fueron realizadas investigaciones en el ramo de la electricidad, lo cual llevo al entendimiento de sus fenómenos y a su vez a la creación de generadores de energía eléctrica, ya que gracias a su versatilidad pudo ser transformada en energía calorífica, luminosa y mecánica, además de poder ser transportada con facilidad a través de cables conductores, lo cual ocasiono su empleo masivo para satisfacer la demanda tanto en el hogar como en la gran industria. Sin embargo, el recurso energético utilizado por estos generadores siguió siendo de origen fósil, principalmente diésel y gasolina.*

*Por lo descrito anteriormente es posible concluir que los avances tecnológicos realizados en la revolución industrial y la mayoría de los actuales, se han llevado a cabo contemplando utilizar recursos energéticos de origen fósil, sin tomar en cuenta la demanda excesiva por parte de una población creciente y económicamente estable, ni de las consecuencias generadas por los gases de efecto invernadero que son producto de la combustión, y que día a día son*

acumulados en la atmósfera y no pueden ser procesados por los organismos fotosintéticos a la velocidad que se crean.

En la actualidad se puede apreciar un decremento en el uso del petróleo y sus derivados como principal fuente generadora de energía (ilustración 1), debido principalmente a las dificultades actuales de su extracción y al aumento de precios al que conlleva.

#### Shares of global primary energy consumption by fuel

Percentage

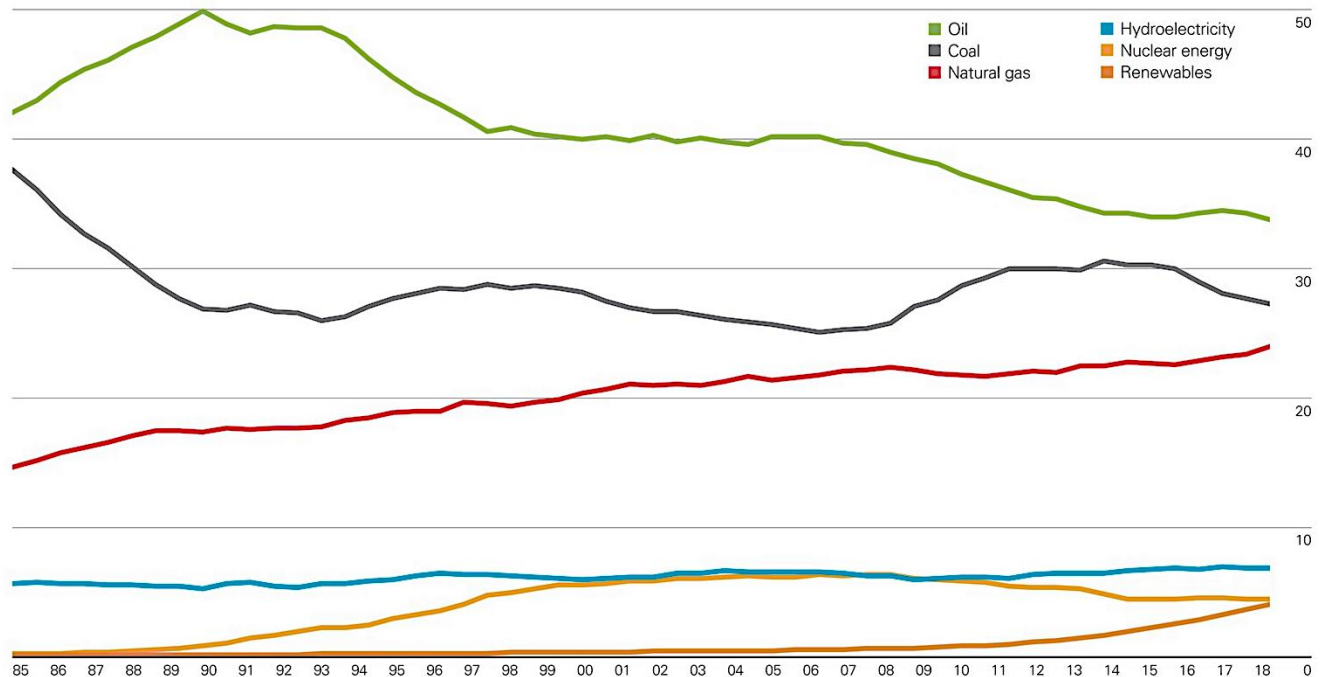


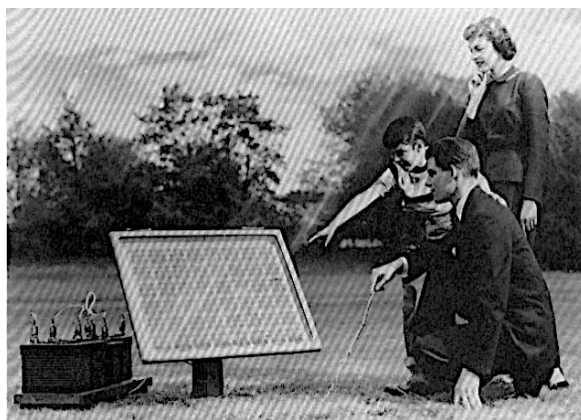
Ilustración 1. Porcentaje del consumo mundial de energía primaria [5].

Sin embargo, los recursos energéticos de origen fósil siguen representando la mayor fuente generadora de energía a nivel mundial, pero gracias a la preocupación de un sector de la población mundial se han llevado a cabo protocolos, como el de Kioto creado en 1997 e implementado en el 2005 [2], y también avances tecnológicos que son capaces de generar energía eléctrica y a su vez ser amigables con el medio ambiente, uno de estos avances tecnológicos es el panel fotovoltaico, que es capaz de generar energía eléctrica con ayuda de la radiación solar que llega a la superficie terrestre. El avance en esta tecnología ha sido lento, pero actualmente es un medio por el cual es posible satisfacer parte de la demanda energética sin generar gases de efecto invernadero.

## 1.2 La energía solar y los paneles fotovoltaicos en el tiempo

*La energía solar ha existido desde los inicios del sistema planetario y es un elemento fundamental para el desarrollo de vida en el planeta Tierra y, posiblemente, en el Universo. Con el paso de los años las civilizaciones se han percatado de los múltiples beneficios a los que conlleva su utilización, y han buscado la manera de aprovecharla lo mejor posible. En un principio se comenzó con el aprovechamiento de la energía solar pasiva, después con técnicas para el aprovechamiento de la energía solar térmica y en la actualidad con el desarrollo de la energía solar fotovoltaica, de la cual se puede resumir lo siguiente.*

- *La energía solar fotovoltaica tiene como inicio el año 1838 con el descubrimiento hecho por el científico francés Alexandre Edmond Becquerel, ya que al exponer al Sol una pila electrolítica con electrodos de platino la corriente aumento.*
- *Posteriormente en 1873 el ingeniero eléctrico Willoughby Smith analizó el efecto fotovoltaico en el selenio, ya que, al utilizarlo como material de un circuito de prueba para cableado submarino obtuvo datos inconsistentes, al realizar la investigación pertinente a estas inconsistencias, pudo concluir que la conductividad del selenio aumenta con la presencia de luz intensa.*
- *En 1876 los ingleses William Grylls Adams y Richard Evans Day descubrieron que al iluminar una unión de selenio y platino se presenta un efecto fisicoquímico que genera voltaje y corriente.*
- *En 1954 Calvin Fuller, Gerald Pearson y Daryl Chapin desarrollan en los laboratorios Bell la primer célula de silicio fotovoltaico con una eficiencia del 4 [%], en la Ilustración 2 se muestra el anuncio del primer módulo fotovoltaico.*



*Ilustración 2. Anuncio del primer módulo fotovoltaico, Laboratorios Bell [11].*

- En 1955 Western Electric comenzó a vender licencias comerciales de tecnología de silicio fotovoltaico.
- En 1957 la extinta URSS lanza su primer satélite espacial el "Sputnik 1" y posteriormente 2 años más tarde lo haría EUA con el "Vanguard 1" (ilustración 3), el cual tenía una fuente auxiliar energética conformada por células fotovoltaicas.

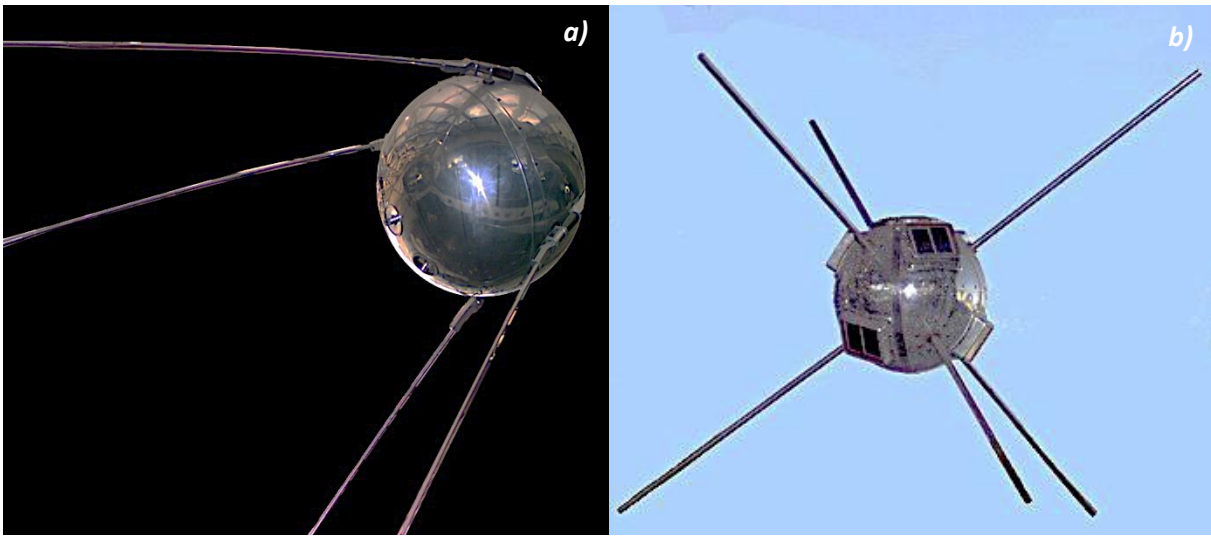


Ilustración 3. a) Sputnik 1 y b) Vanguard 1 [Wikipedia].

Tras la creación de la primer célula de silicio fotovoltaico en 1954 y de su lento desarrollo tecnológico, con el paso de los años se ha mejorado y perfeccionado. Lo cual ha llevado a considerar implementar este tipo de tecnología para la obtención de energía eléctrica, ya que resulta ser factible, económica y ecológica, puesto que la superficie terrestre recibe en promedio 121 [PW/año]\* mientras que el dato más reciente de consumo energético mundial es de 15 [TW/año]\*\*.

Además, en la actualidad es posible adquirir paneles fotovoltaicos a un precio razonable y con una eficiencia máxima (capacidad de convertir la energía solar que incide en el panel fotovoltaico en energía eléctrica) de alrededor del 22 [%], lo cual hace factible su implementación en hogares, industrias y plantas de generación eléctrica.

\* 1 [PW] =  $1 \times 10^{15}$  [W].

\*\* 1 [TW] =  $1 \times 10^{12}$  [W].

## Capítulo 2. Empleo de paneles fotovoltaicos en las edificaciones

### 2.1 Características generales de los paneles fotovoltaicos

La unidad fundamental de los paneles fotovoltaicos es la célula fotovoltaica, hecha con un material semiconductor que es capaz de absorber fotones de la radiación solar y emitir electrones, en su mayoría hecha de silicio.

La configuración de la célula fotovoltaica (ilustración 4) consiste en 2 capas de silicio, silicio tipo *n* y *p*, ambas dotadas de impurezas de átomos de fósforo y boro, respectivamente.

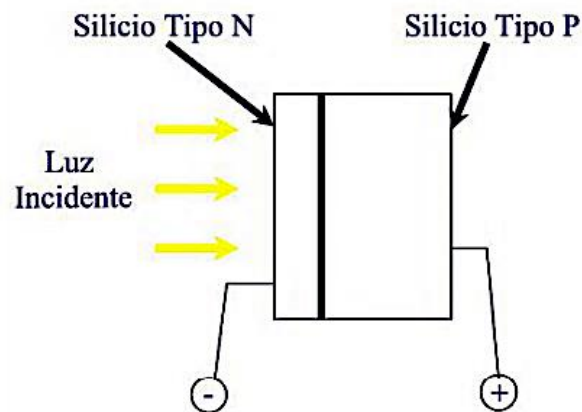


Ilustración 4. Célula fotovoltaica [30].

Al dotar a una capa de silicio con impurezas de fósforo, se crea una red cristalina en la que el quinto electrón de valencia del fósforo no queda bien integrado, ya que el silicio solo cuenta con 4 electrones de valencia. Por lo que, al momento en que los fotones de la radiación solar inciden sobre el silicio tipo *n*, el quinto electrón de valencia queda libre, con ello la densidad de electrones es mayor a la de huecos receptores, por lo que es necesario una segunda capa de silicio con impurezas de boro, ya que el boro cuenta con solo 3 electrones de valencia generando así huecos receptores. De esta manera los electrones fluyen del silicio tipo *n* al silicio tipo *p* y los huecos fluyen de manera inversa, generando así un campo eléctrico.

Comercialmente las células fotovoltaicas más empleadas son las de silicio monocristalino, policristalino y amorfo o capa fina (ilustración 5), en donde cada célula fotovoltaica del mismo tipo de silicio tendrá una eficiencia que variará dependiendo del fabricante, pero en general se pueden agrupar en los siguientes intervalos.

- Para el caso de las células de silicio monocristalino se encuentran eficiencias en un intervalo del 15 al 22 [%], debido a que son fabricadas con silicio de alta pureza.
- Las células de silicio policristalino se encuentran en un intervalo de eficiencia del 13 al 16 [%], ya que el silicio con el que se fabrican es de una pureza inferior.
- Mientras que las de silicio amorfo se encuentran en un intervalo de eficiencia del 7 al 13 [%], debido a que el silicio de fabricación se encuentra en su forma no cristalina.

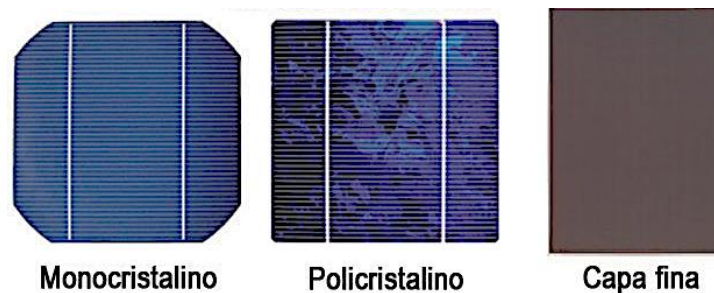
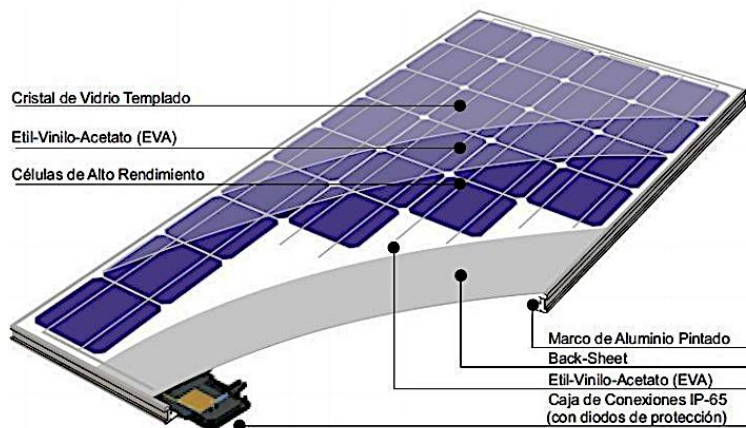


Ilustración 5. Tipos de silicio utilizados en la creación de células fotovoltaicas [7].

Cabe mencionar que, para el caso de células fotovoltaicas de silicio monocristalino y policristalino, la eficiencia máxima, que dependerá del fabricante, sólo se alcanzará considerando una inclinación adecuada de la célula fotovoltaica respecto al Sol, ya que este tipo de células fotovoltaicas aprovechan principalmente la radiación solar directa, por lo que de no cumplir con la inclinación la eficiencia de la célula fotovoltaica disminuirá considerablemente.

Caso contrario al hablar de una célula de silicio amorfo, ya que su eficiencia no se verá afectada de forma considerable al no cumplir con dicha inclinación, esto se debe a que aprovechan de mejor manera la radiación solar difusa, comparadas con las células fotovoltaicas de silicio monocristalino y policristalino.

Por otro lado, la configuración estándar de los paneles fotovoltaicos, tanto de silicio monocristalino como policristalino, consiste en un conjunto de células de cada tipo conectadas entre sí, en serie o paralelo, que son encapsuladas en un polímero transparente y colocadas entre dos estratos. El superior de vidrio templado y el inferior de TEDLAR un polímero con alta resistencia a la intemperie, todo unido mediante un marco de aluminio (ilustración 6).



*Ilustración 6. Configuración estándar de los paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino [11].*

*Las dimensiones y masa de estos paneles fotovoltaicos, variarán dependiendo de su potencia máxima y del fabricante.*

*A continuación (Ilustración 7), se muestran como ejemplos las dimensiones de los paneles fotovoltaicos con mayores potencias máximas existentes en el mercado, entre 320 y 360 [W], éstas rondan los 2 [m] de largo, 1 [m] ancho y 0.05 [m] de espesor, con una masa de entre 20 a 25 [kg].*



350W MONO

PhonoSolar  
SHARE THE SUN, POWER THE FUTURE!

330W POLI

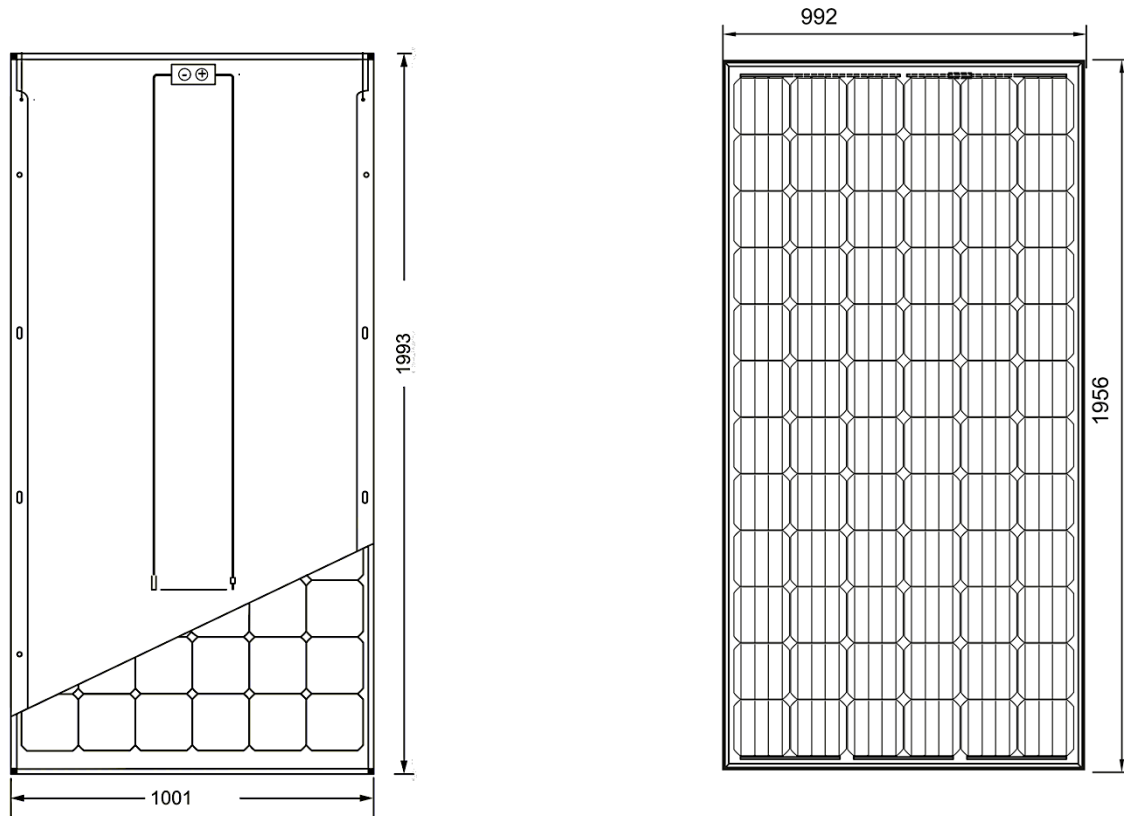


Ilustración 7. Ejemplos de las dimensiones de paneles fotovoltaicos comerciales en [mm], [9].

A diferencia de los paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino, los paneles de silicio amorfo pueden ser de dimensiones variables, y la masa tan solo del silicio amorfo se encuentra en un intervalo de 2.5 a 3.5 [kg/m<sup>2</sup>].

## 2.2 Características generales de las edificaciones con empleo de paneles fotovoltaicos

Debido a que la incorporación de paneles fotovoltaicos en edificaciones requiere de una gran cantidad de área dentro de la misma, existen tres características importantes de la edificación que dan soluciones factibles a este problema. La primera y más importante es la cubierta, ya que en la mayoría de las edificaciones la cubierta es el lugar menos aprovechado, esto se aprecia principalmente en naves industriales (ilustración 8), además se tiene la ventaja de no interferir con las actividades habituales que se lleven a cabo y de tener un bajo costo en su

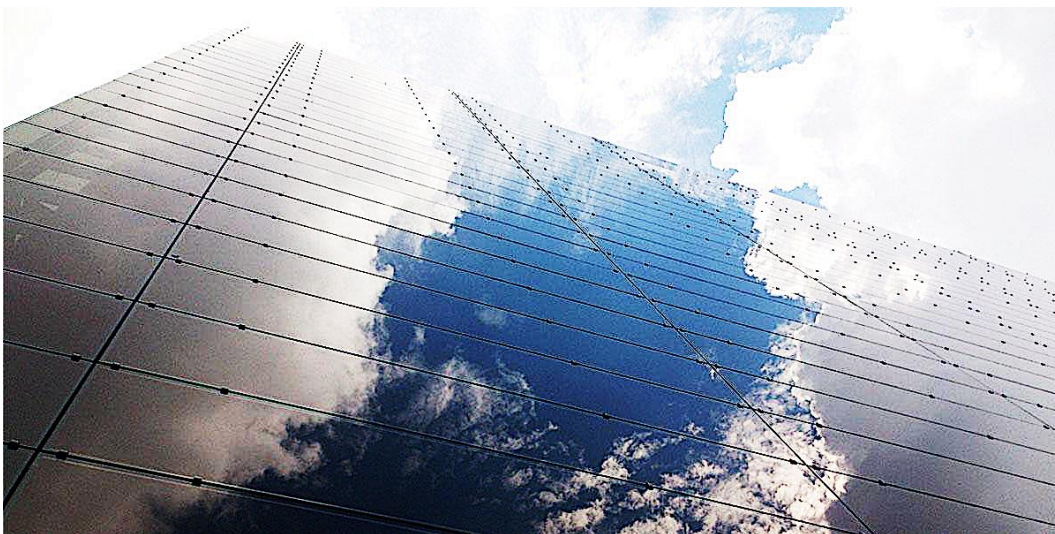


*incorporación. Los paneles fotovoltaicos mayormente empleados en esta situación son los de silicio monocristalino y policristalino.*



*Ilustración 8. Instalación de energía solar fotovoltaica para autoconsumo en Muebles Santos Camporrapado, España [edfsolar.es].*

*La segunda es la fachada, esta característica es principalmente explotada en las edificaciones con fachada acristalada, ya que los cristales son sustituidos por paneles fotovoltaicos laminados de capa fina (ilustración 9) y al igual que en la cubierta, éstos no interfieren con las actividades habituales que se llevan a cabo, la desventaja es su alto costo en la incorporación.*



*Ilustración 9. Edificio de la sede de FEMSA, Monterrey, N.L., [onyxsolar.com].*

La tercera es la marquesina, principalmente utilizada en edificaciones habitacionales, ya que además de ser empleados como generadores de energía eléctrica se usan como elementos de sombreado (ilustración 10). En este caso se usan tanto paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino como de silicio amorfos.



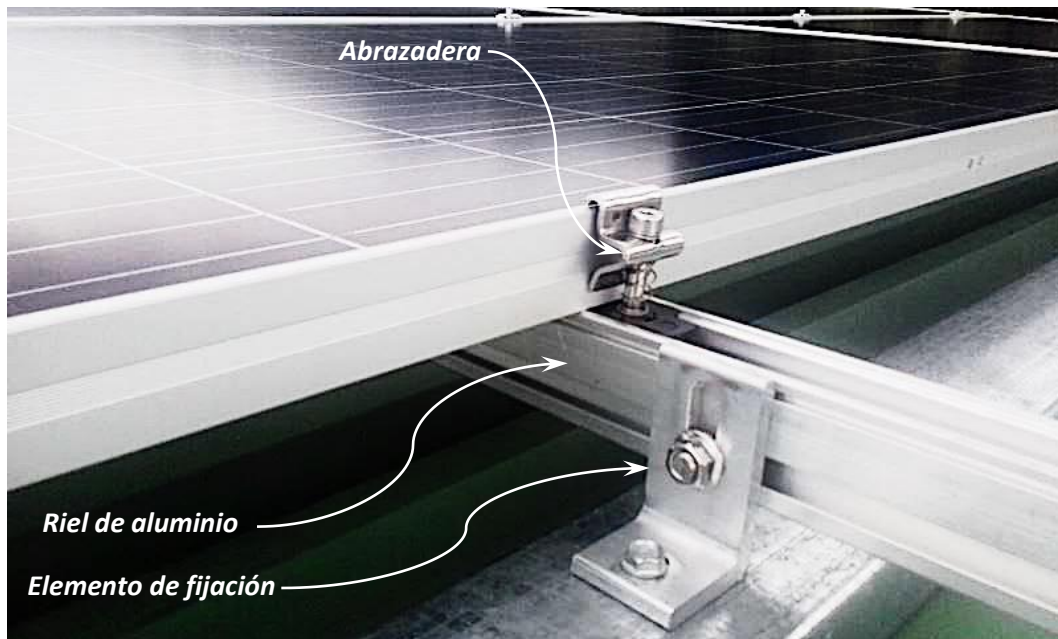
Ilustración 10. Ejemplos de uso en marquesina [ecoinventos.com].

Para cualquiera que sea el caso de incorporación de paneles fotovoltaicos en la edificación, es necesario considerar los elementos que se encuentren alrededor de la misma y pudiesen generar áreas de sombreado sobre los paneles fotovoltaicos, esto es de suma importancia en los de silicio monocristalino y policristalino.

### 2.3 Componentes del sistema edificación-panel

Para cualquier caso de incorporación de paneles fotovoltaicos en la edificación, se requiere de un sistema de sujeción con un comportamiento adecuado, principalmente ante efectos del viento.

Comercialmente lo más común es emplear rieles de aluminio sobre los cuales se sujetan los paneles fotovoltaicos mediante abrazaderas (ilustración 11). Estos rieles a su vez son fijados a la edificación con algún elemento comercial, el cual variará dependiendo de las características de la zona de la edificación en donde se planea incorporar el panel fotovoltaico (más información al respecto se presenta en la referencia 15).



*Ilustración 11. Componentes del sistema de sujeción [dissetigreen.com].*

*Para el caso de incorporación de paneles fotovoltaicos en fachada, no se requiere de algún elemento adicional que haga que el panel fotovoltaico cumpla con una inclinación en especial, ya que al emplear silicio amorfo este no se verá afectado de forma considerable en cuanto a su eficiencia. La ilustración 12 muestra un ejemplo del sistema de sujeción en fachada.*



*Ilustración 12. Ejemplo de sistema de sujeción en fachada [13].*

Caso contrario al incorporar paneles fotovoltaicos en cubierta, ya sean horizontales o inclinadas, debido a que en este caso se emplean paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino, que sí se verán afectados en su eficiencia. Por lo que se emplean estructuras adicionales de forma triangular, de tal manera que el panel fotovoltaico cumpla con una inclinación adecuada para brindar la mayor eficiencia (ilustración 13).



Ilustración 13. Ejemplo de estructura para el cumplimiento de inclinación en cubiertas [damiasolar.com].

Para el caso de la marquesina, se emplean paneles fotovoltaicos de silicio amorfo como monocristalino y policristalino, y siempre será necesario emplear una estructura adicional, ya que el panel fotovoltaico solo será soportado por ella, además en caso de emplear paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino, ésta ayudará a cumplir con la inclinación requerida, para una adecuada eficiencia (ilustración 14).

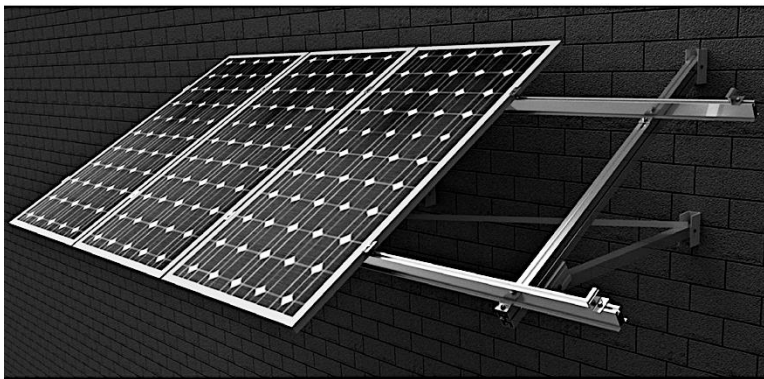


Ilustración 14. Ejemplo de estructura de soporte de pared para paneles fotovoltaicos en marquesina [teknosolar.com].

## 2.4 Ángulo de inclinación “ $\beta$ ”

Como se mencionó anteriormente, el ángulo de inclinación en un panel fotovoltaico de silicio monocristalino o policristalino es particularmente importante, y debe de ser considerado independientemente de la zona en donde será incorporado en la edificación, ya que impactará de forma considerable su eficiencia.

Para argumentar de forma adecuada el ángulo de inclinación a emplear, es necesario describir el movimiento de traslación de la Tierra y la latitud de un punto sobre su superficie, lo cual se resume a continuación.

El movimiento de traslación está descrito por una órbita elíptica en la que en uno de sus focos se encuentra el Sol (ilustración 15), y debido a la excentricidad que se presenta en dicha órbita la distancia entre el Sol y la Tierra varía, con una distancia mínima de 147.5 millones de kilómetros en los inicios de enero (perihelio) y una máxima de 152.6 millones de kilómetros en los de julio (afelio).

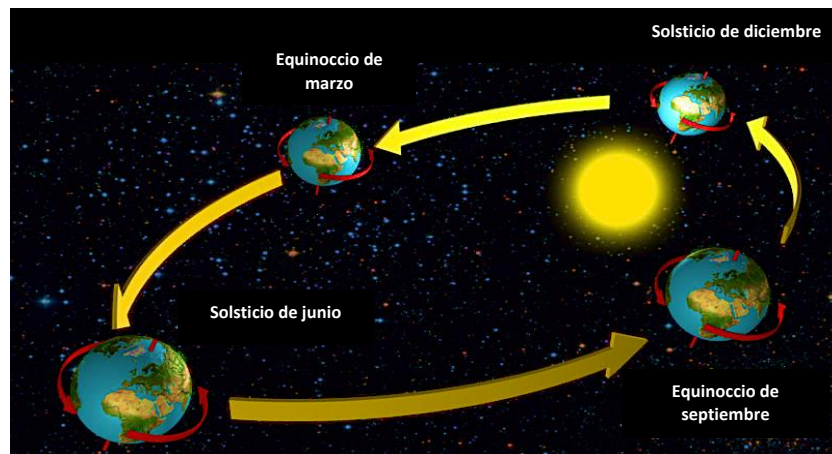
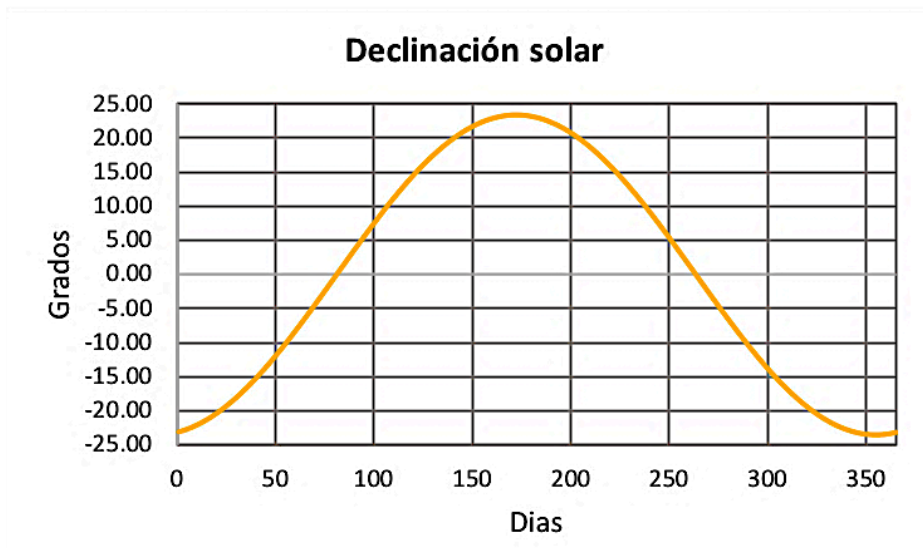


Ilustración 15. Movimiento de traslación de la Tierra [concepto.de].

La órbita terrestre se encuentra en el plano denominado eclíptico y el ángulo formado entre la normal a dicho plano y el eje de rotación de la Tierra permanece constante a lo largo del movimiento de traslación, con un valor aproximado de  $23.5^{\circ}$ .

Caso contrario al hablar del ángulo formado entre el plano ecuatorial y el plano eclíptico, denominado declinación solar “ $\delta$ ”, ya que varía a lo largo del movimiento de traslación, como se muestra en la ilustración 16.



*Ilustración 16. Variación anual de la declinación solar [elaboración propia].*

*Esta variación de la declinación solar se debe a la constante angular entre el plano eclíptico y el eje de rotación.*

*La declinación solar es utilizada para determinar la perpendicularidad de la radiación solar en la superficie terrestre a lo largo del movimiento de traslación.*

*Dentro del intervalo de valores que puede tomar la declinación solar existen tres relevantes, que hacen entender de forma sencilla lo dicho en el párrafo anterior:*

- *En el solsticio de junio (ilustración 17) la declinación solar presenta un máximo de  $+23.5^{\circ}$ , por lo que el hemisferio Norte se encuentra a una menor distancia del Sol que el hemisferio Sur, provocando así que la radiación solar se presente perpendicular al trópico de cáncer que se encuentra ubicado a una latitud de  $23.5^{\circ}$  Norte.*

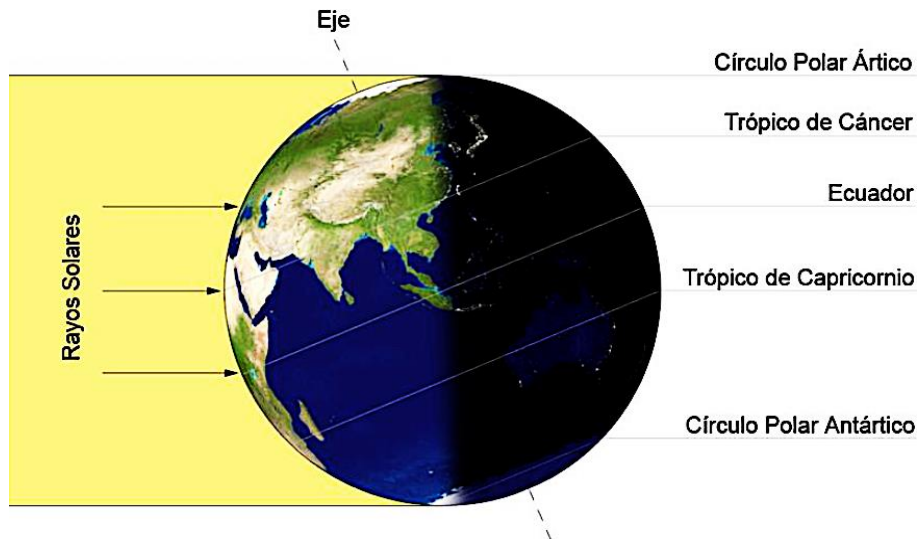


Ilustración 17. Solsticio de junio [27].

- En el solsticio de diciembre (ilustración 18) la declinación solar presenta un mínimo de  $-23.5^{\circ}$ , causando un efecto inverso al de la declinación solar máxima, es decir el hemisferio Sur se encuentra a una menor distancia del Sol que el hemisferio Norte, provocando que la radiación solar se presente perpendicular al trópico de capricornio ubicado a una latitud de  $23.5^{\circ}$  Sur.

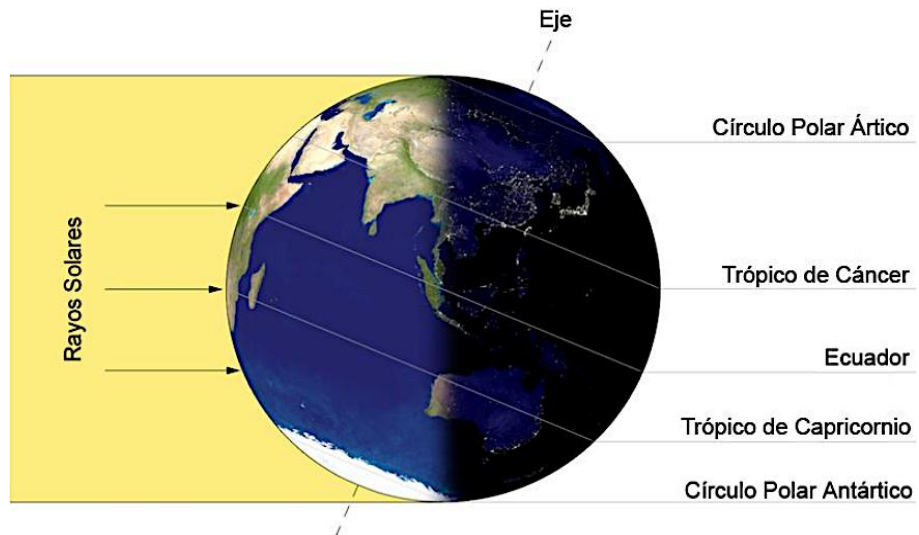


Ilustración 18. Solsticio de diciembre [27].

- Para el caso de ambos equinoccios (ilustración 19), en marzo y septiembre, la declinación solar presenta un valor de  $0^{\circ}$ , por lo que tanto el hemisferio Norte como

Sur se encuentran a la misma distancia del Sol, generando que la radiación solar se presente perpendicular al ecuador ubicado a una latitud de  $0^{\circ}$ .

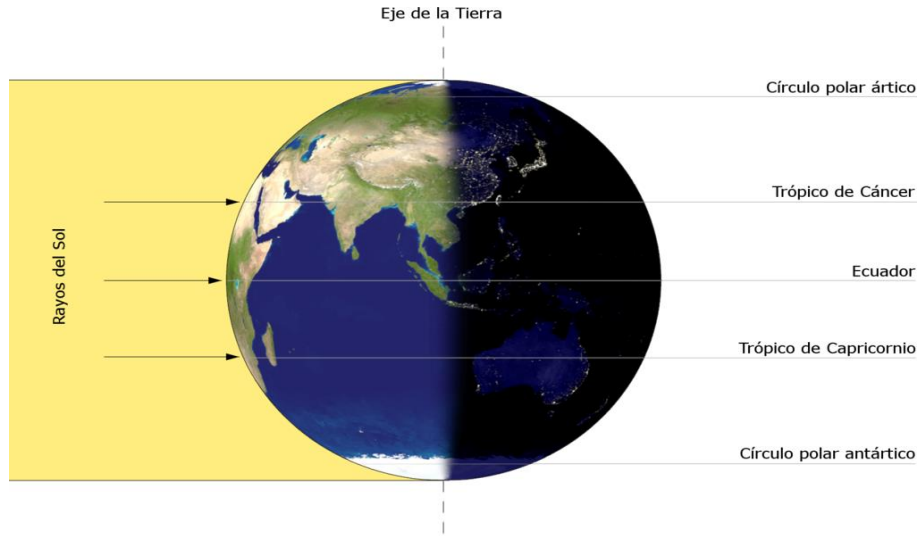


Ilustración 19. Equinoccios de marzo y septiembre [27].

Por otro lado, la latitud de un punto "P" (ilustración 20) sobre la superficie terrestre se define como el ángulo "a" formado entre el plano ecuatorial y la línea que une el centro de la Tierra con el punto de interés.

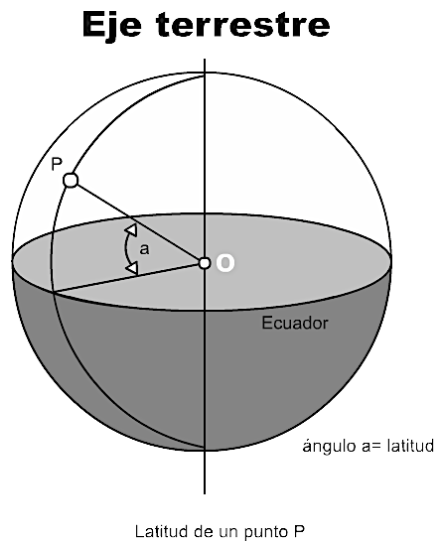


Ilustración 20. Latitud de un punto P en la superficie terrestre [12].

Con lo anteriormente expuesto podemos concluir lo siguiente:



*Si se desea ubicar un panel fotovoltaico en un punto “P” de la superficie terrestre cuya latitud sea “a”, y además que la incidencia de radiación solar se presente perpendicular sobre éste a lo largo del movimiento de traslación, provocando así la mayor eficiencia anual, el ángulo de inclinación “β” con respecto a la horizontal del punto “P” deberá ser igual a la suma o diferencia de la latitud y la declinación solar, dependiendo del hemisferio en el que se encuentre el punto de interés y orientándolo al hemisferio opuesto, es decir:*

*$\beta = a - \delta$ ; aplicable a una ubicación en el hemisferio Norte, orientado al hemisferio Sur.*

*$\beta = a + \delta$ ; aplicable a una ubicación en el hemisferio Sur, orientado al hemisferio Norte.*

*El hecho de considerar a la declinación solar para determinar el ángulo de inclinación de un panel fotovoltaico, hace de la tarea algo más difícil, debido a su variación a lo largo del movimiento de traslación, por lo que se emplean seguidores solares para conseguirlo, es decir un sistema fotovoltaico móvil.*

*Al incorporar paneles fotovoltaicos en edificaciones lo más común es hacerlo de forma fija, por lo que se pueden especificar tres ángulos de inclinación que arrojaran casos de eficiencia distintos:*

*Caso 1. Mayor eficiencia en los meses de invierno.*

$$\beta = a + 10^{\circ}$$

*Caso 2. Mayor eficiencia promedio anual.*

$$\beta = a$$

*Caso 3. Mayor eficiencia en los meses de verano.*

$$\beta = a - 10^{\circ}$$

*Independientemente del caso a considerar, la orientación del ángulo de inclinación del panel fotovoltaico se hará hacia el hemisferio opuesto al de su ubicación.*

*Cabe destacar que lo anteriormente expuesto sólo se presentará en las condiciones solares del medio día.*

## 2.5 ¿Cuántos paneles fotovoltaicos emplear?

*La cantidad de paneles fotovoltaicos a incorporar en la edificación, dependerá de la potencia nominal requerida y la potencia pico proporcionada por los paneles fotovoltaicos seleccionados, además de tener una restricción de área dentro de la edificación.*

*Para el caso de incorporación en cubierta los paneles fotovoltaicos son agrupados en filas, las cuales, dependiendo de su inclinación respecto a la cubierta " $\beta_{CA}$ ", deberán estar separadas por una distancia mínima, de tal forma que se eviten áreas de sombreado y se facilite el acceso para su mantenimiento, cabe mencionar que la separación entre paneles fotovoltaicos de la misma fila puede ser nula.*

*El ángulo de inclinación respecto a la cubierta " $\beta_{CA}$ " y el ángulo de inclinación respecto a la horizontal del punto de ubicación " $\beta$ " pueden ser iguales para el caso de una cubierta horizontal o diferentes para el de una inclinada, es decir:*

$$\beta_{CA} = \beta; \text{ para una cubierta horizontal.}$$

$$\beta_{CA} = \beta - \phi; \text{ para una cubierta inclinada, en donde } \phi \text{ es el ángulo de inclinación de la cubierta.}$$

*Como se mencionó anteriormente, la incorporación de paneles fotovoltaicos en una edificación se hace de forma fija, por lo que existirán tres posibles valores de " $\beta$ " de los cuales será seleccionado uno dependiendo del caso de eficiencia deseado.*

*En el siguiente esquema (ilustración 21) se puede apreciar que el área de sombreado generada en el solsticio de invierno alcanza su valor máximo, tanto para cubiertas inclinadas como horizontales bajo las condiciones solares del medio día, esto es aplicable a cualquier panel fotovoltaico cuya inclinación este orientada al hemisferio opuesto al de su ubicación.*

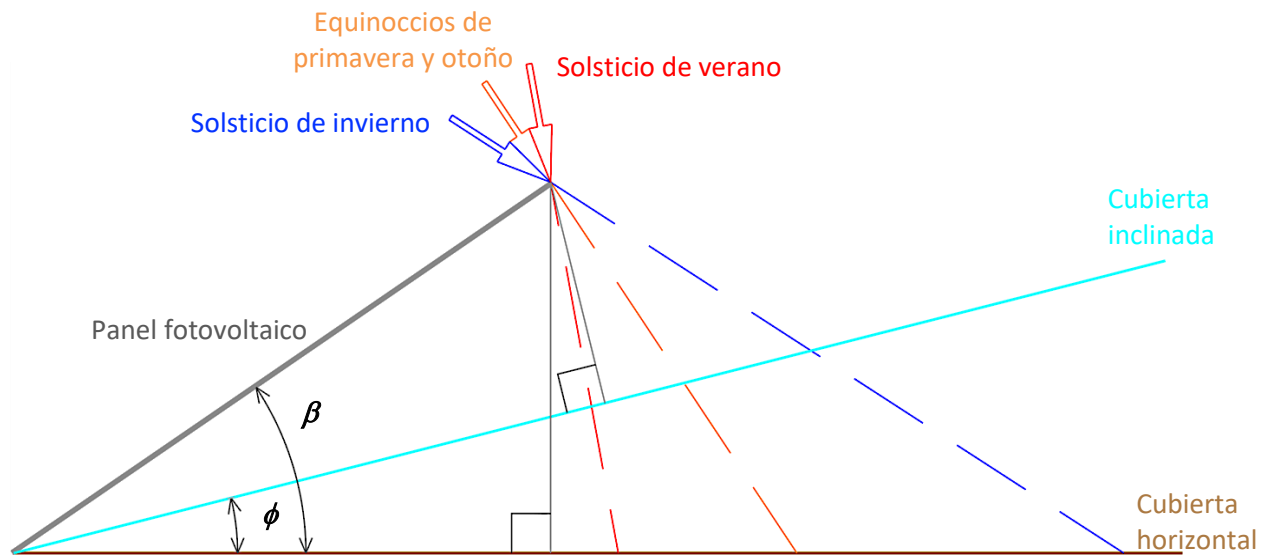


Ilustración 21. Área de sombreado generada por panel fotovoltaico con inclinación “ $\beta$ ”, orientada hacia el hemisferio opuesto al de su ubicación, bajo condiciones solares del medio día en solsticios y equinoccios [elaboración propia].

Por lo tanto, el cálculo de la distancia mínima de separación entre filas de paneles fotovoltaicos, se hará con las características trigonométricas generadas en esta temporada, las cuales se resumen a continuación para los tres casos de eficiencia:

### Caso 1. Mayor eficiencia en los meses de invierno

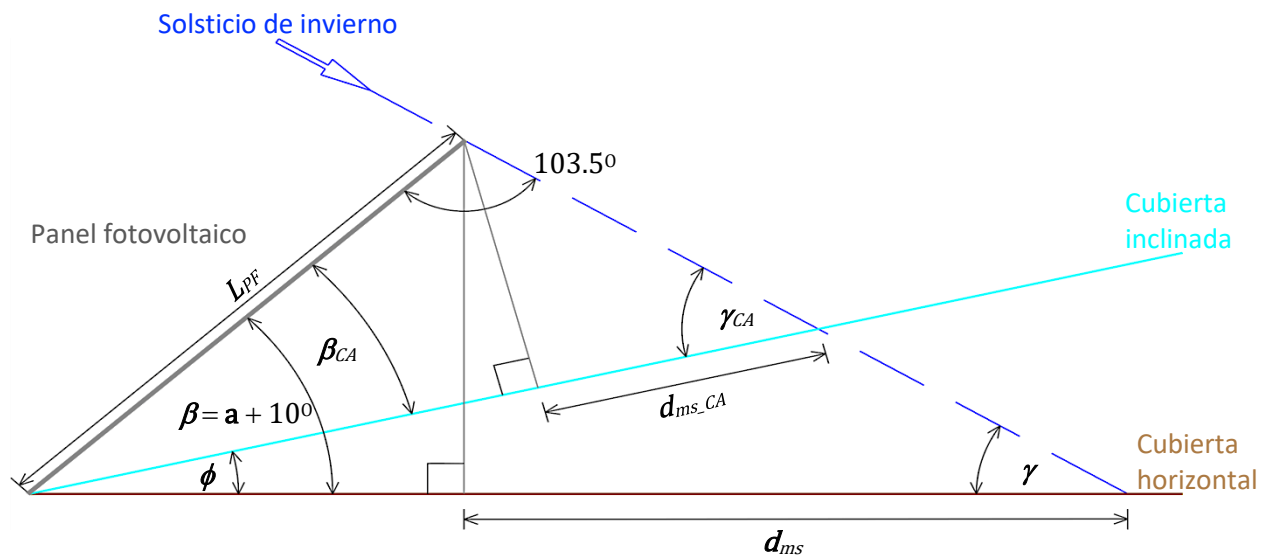


Ilustración 22. Características trigonométricas generadas considerando una mayor eficiencia en los meses de invierno [elaboración propia].

Caso 2. Mayor eficiencia promedio anual

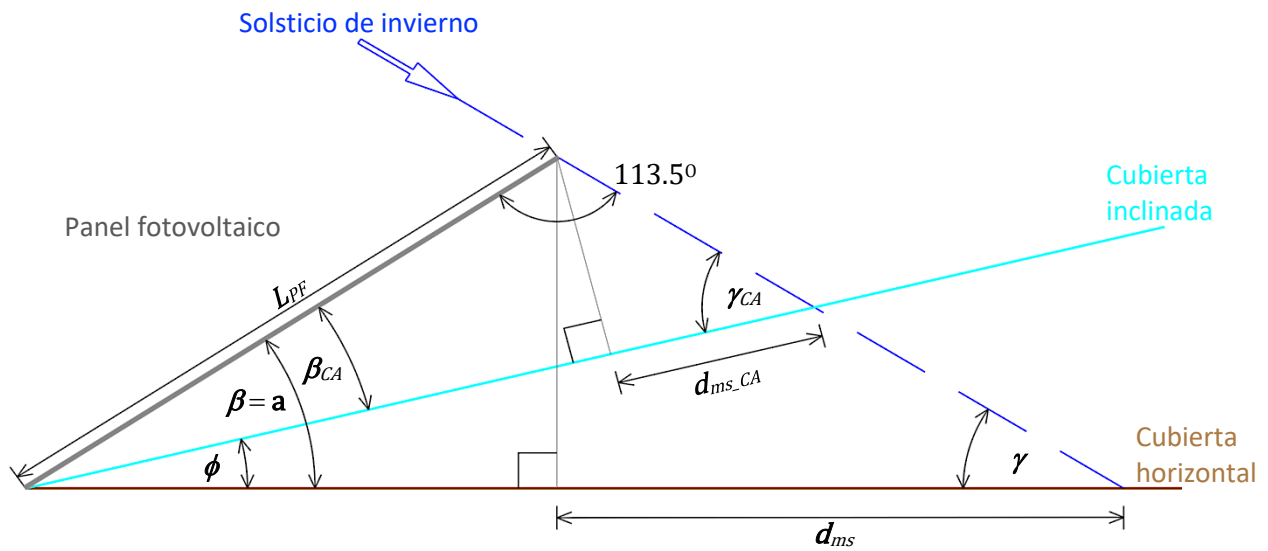


Ilustración 23. Características trigonométricas generadas considerando una mayor eficiencia promedio anual [elaboración propia].

Caso 3. Mayor eficiencia en los meses de verano

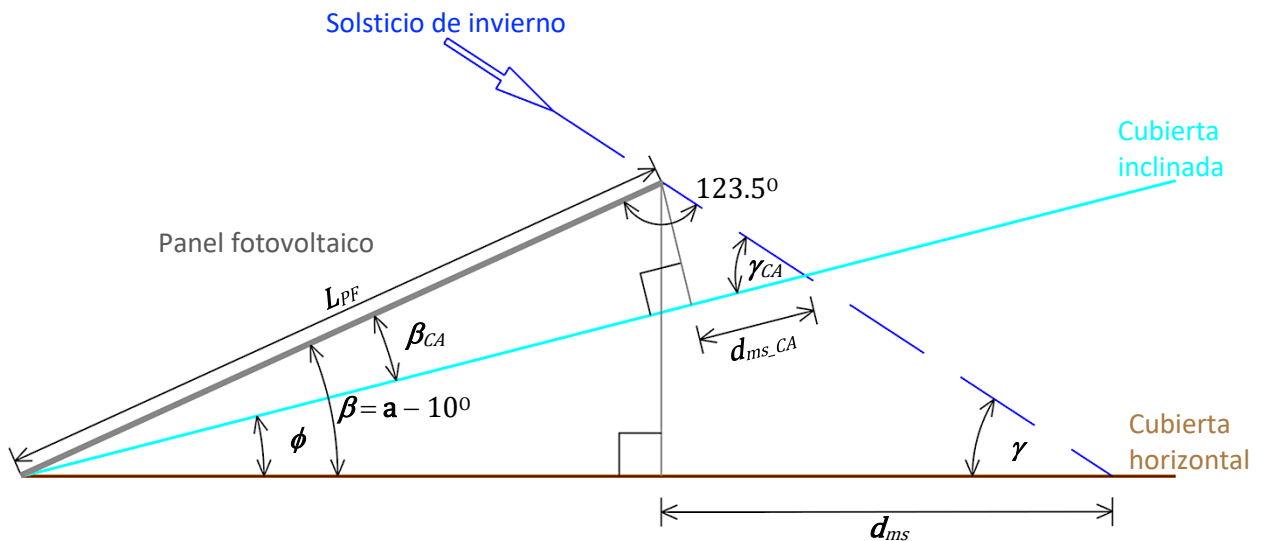


Ilustración 24. Características trigonométricas generadas considerando una mayor eficiencia en los meses de verano [elaboración propia].

De los esquemas anteriores (ilustraciones 22, 23 y 24) podemos concluir que la distancia mínima de separación se calculará de la siguiente manera:

$$d_{ms} = \frac{(L_{PF})(\sin \beta)}{\tan \gamma} ; \text{ para una cubierta horizontal}$$

y

$$d_{ms\_CA} = \frac{(L_{PF})(\sin \beta_{CA})}{\tan \gamma_{CA}} ; \text{ para una cubierta inclinada}$$

En donde “ $\gamma$ ” y “ $\gamma_{CA}$ ” son los ángulos formados entre la cubierta y la hipotenusa de la proyección del área de sombreado, para una cubierta horizontal e inclinada, respectivamente, estos ángulos serán calculados mediante la suma de los ángulos internos de un triángulo, la cual es igual a 180°.

### Capítulo 3. Diseño del modelo empleado en el estudio en túnel de viento

#### 3.1 Características del modelo de edificación baja

Con el propósito de aprovechar los estudios previos realizados en el túnel de viento (Amaya-Gallardo, 2019), se utilizó uno de los modelos de edificaciones bajas previamente estudiados. Este modelo consta de las características mostradas en la ilustración 25, las cuales se encuentran a una escala geométrica de 1:50.

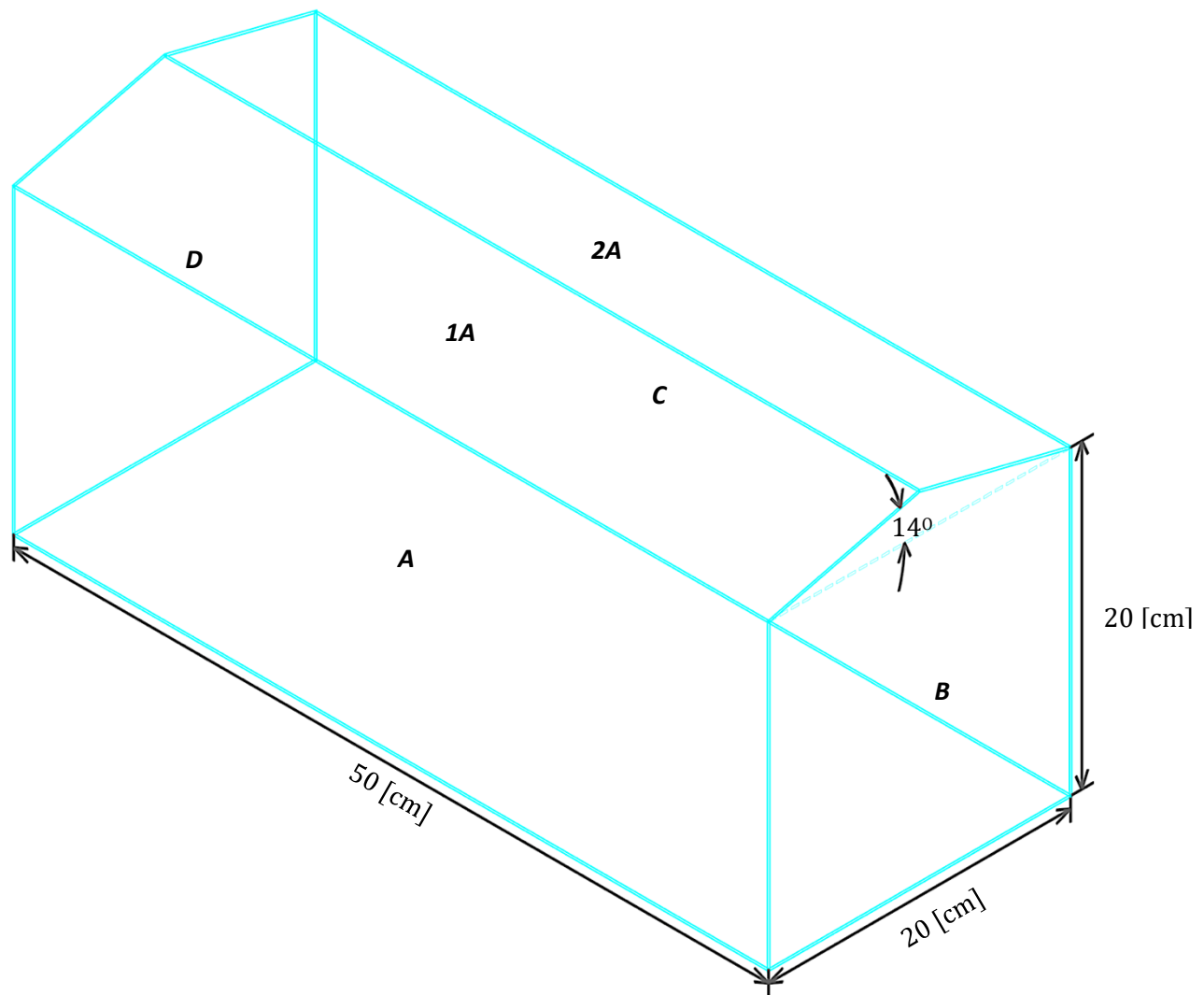


Ilustración 25. Características principales del modelo de edificación baja de dos aguas empleado en el estudio de túnel de viento, clasificación de paredes laterales y secciones de cubierta [elaboración propia].

*El modelo seleccionado es representativo de las edificaciones bajas con cubierta de dos aguas, que poseen mayor área de cubierta, por lo cual fue seleccionado para poder integrar la máxima cantidad de paneles fotovoltaicos en ella.*

### 3.2 Dimensiones y características de incorporación del modelo de panel fotovoltaico en el modelo de edificación baja

*Para incorporar el modelo del panel fotovoltaico en el de la edificación baja, es necesario ser lo más consistente posible con el manejo de la misma escala, por lo que, considerando las dimensiones a escala real de 2 [m] de largo, 1 [m] de ancho y 0.05 [m] de espesor, para un panel fotovoltaico de entre 320 y 360 [W] como potencia máxima, las dimensiones a escala 1:50 son de 4 [cm] de largo, 2 [cm] de ancho y 0.1 [cm] de espesor.*

*Para la incorporación de los paneles fotovoltaicos en la cubierta se hicieron las siguientes suposiciones:*

1. *La edificación se encuentra a una latitud de 24° Norte.*
2. *La pared lateral "A" de la edificación se encuentra orientada hacia el hemisferio sur.*
3. *Tanto en la periferia como en la cubierta de la edificación no existirá algún elemento que genere área de sombreado en la misma.*
4. *La eficiencia de los paneles fotovoltaicos será la generada por el caso 2.*
5. *Los paneles fotovoltaicos se apoyarán sobre la cubierta con su lado largo.*

*Debido a que la pared lateral "A" de la edificación se encuentra orientada al hemisferio Sur, sólo será factible incorporar filas de paneles fotovoltaicos en la sección "1A" de la cubierta, cada fila contará con un máximo de 12 paneles fotovoltaicos a lo largo de la sección y con una separación entre filas, la cual se calcula a continuación a escala real:*

*Al tratarse de una cubierta inclinada en donde  $\phi = 14^\circ$  y al suponer una mayor eficiencia promedio anual (caso 2);  $\beta_{CA} = \beta - \phi = 24^\circ - 14^\circ = 10^\circ$*

*Bajo las características trigonométricas generadas por el caso 2;  $\gamma_{CA} = 180^\circ - 113.5^\circ - 10^\circ = 56.5^\circ$*

*Por lo tanto la distancia mínima de separación entre filas de paneles fotovoltaicos será la siguiente;  $d_{ms\_CA} = \frac{(L_{PF})(\sin \beta_{CA})}{\tan \gamma_{CA}} = \frac{(1 [m])(\sin 10^\circ)}{\tan 56.5^\circ} = 0.115 [m]$*

Como la distancia mínima de separación entre filas no permite el acceso para el mantenimiento se propone una separación de 50 [cm] a escala real, es decir 1 [cm] a escala 1:50. Por lo tanto sólo se podrán incorporar tres filas de paneles fotovoltaicos en el modelo de edificación baja, como se muestra a continuación en la ilustración 26.

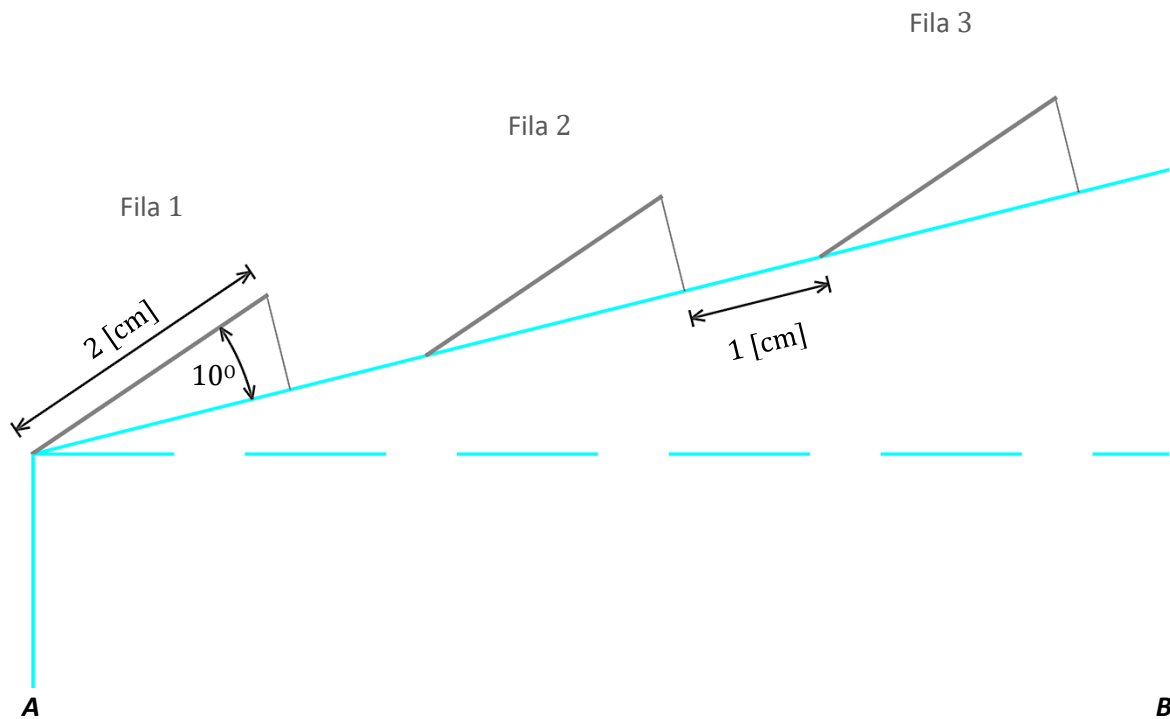


Ilustración 26. Características de incorporación de los modelos de filas de paneles fotovoltaicos en el modelo de edificación baja de dos aguas [elaboración propia].

### 3.3 Elección del material y construcción de los modelos

Para el modelo de la edificación baja se utilizaron dos tipos de materiales para su construcción, acrílico de 3 [mm] de espesor para las paredes laterales (**A**, **B**, **C** y **D**) y madera MDF de 5 [mm] de espesor para la cubierta (sección **1A** y **2A**).

Para el caso del modelo de panel fotovoltaico no fue sencillo definir un material de construcción, debido a que el espesor del modelo tendría que ser de 0.1 [cm], por lo que el material encontrado que cumplió dicho parámetro fue el acrílico de 1 [mm] de espesor; sin embargo, este material presentó complicaciones de deformación en su manejo, por lo tanto, se optó por utilizar acrílico de 3 [mm] de espesor.



Como se mencionó anteriormente, cada fila contará con 12 paneles fotovoltaicos y la separación entre paneles de la misma fila será nula, lo cual hizo del conjunto de modelos individuales de cada panel fotovoltaicos algo más sencillo de realizar, ya que es posible representar cada fila como una regla de acrílico con las siguientes dimensiones (ilustración 27).

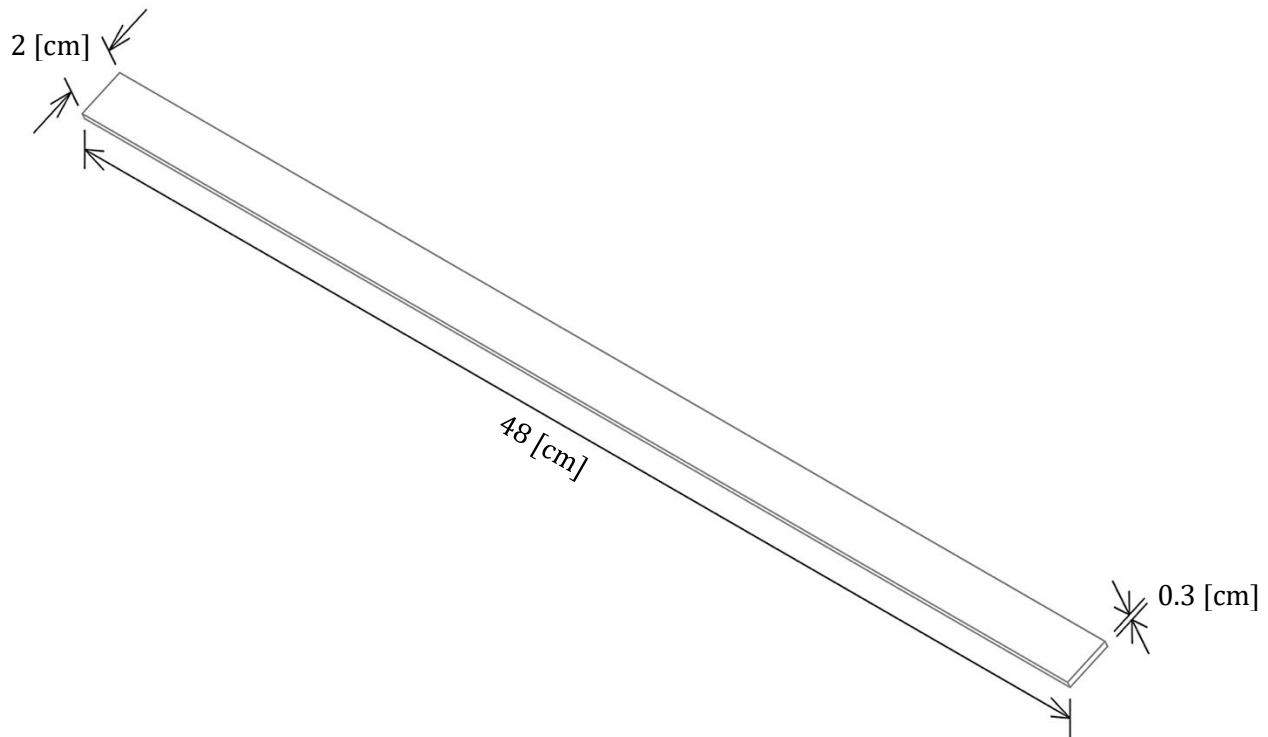
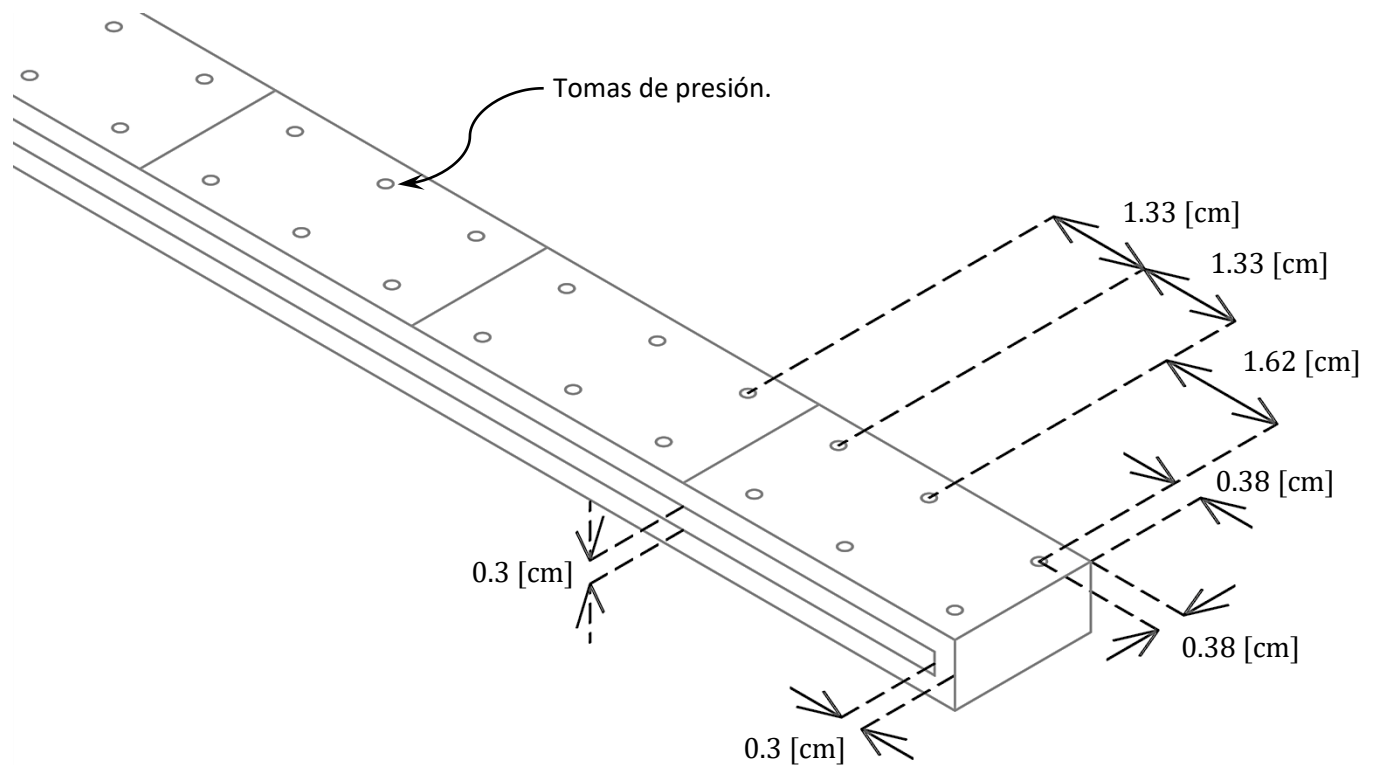


Ilustración 27. Dimensiones del modelo de fila de paneles fotovoltaicos, no instrumentada [elaboración propia].

Sin embargo, para poder obtener los coeficientes de presión neta sobre los paneles fotovoltaicos ante efectos del viento, fue necesario realizar tomas de presión en ambas caras de una de las filas, por lo cual se decidió que esta fila estuviese compuesta por dos reglas con las dimensiones descritas anteriormente y separadas por una distancia de 3 [mm], esto con la finalidad de evitar que las mangueras que son conectadas a las tomas de presión sean obstruidas.

Otro aspecto a tener en cuenta es la distribución de las tomas de presión, igual en ambas caras de la fila, las cuales se recomienda estén lo más cercanas posible a los bordes del modelo, ya que en estos puede existir desprendimiento de vórtices. Por lo tanto, se tomó la decisión de que el modelo cumpliera con las siguientes características (ilustración 28).



*Ilustración 28. Características de distribución de tomas de presión, en ambas caras del modelo de fila de paneles fotovoltaicos instrumentada [elaboración propia].*

*Como se puede apreciar la distribución de las dos primeras tomas de presión del panel fotovoltaico inicial de la fila, varía con respecto a la distribución de las tomas de presión intermedias, esto con el propósito de ubicar las tomas de presión iniciales lo más cercanas posible al borde, lo cual también se repite en la distribución de las dos últimas tomas de presión del último panel fotovoltaico de la fila.*

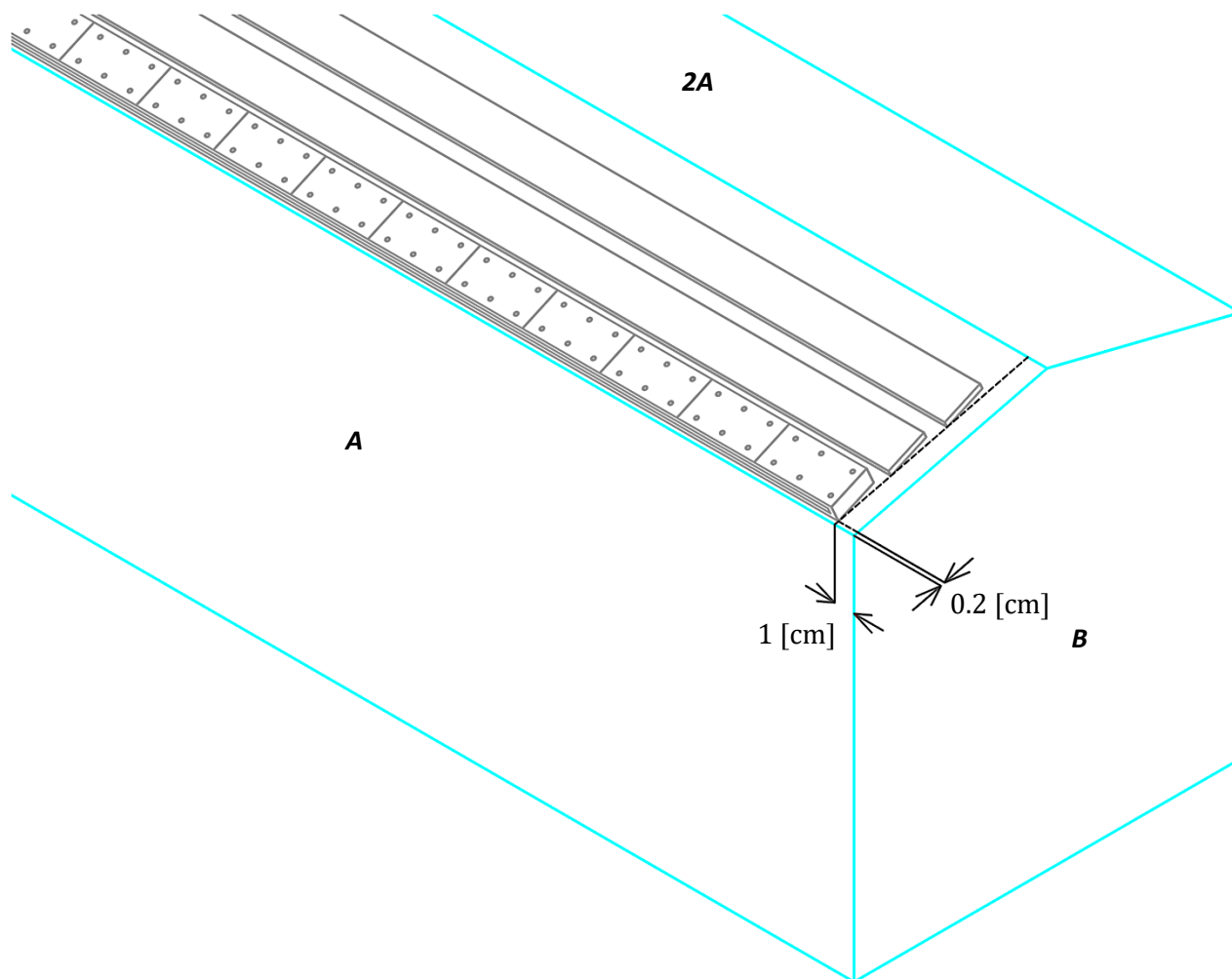
*De igual manera la cantidad de tomas de presión obedece a la cantidad de espacio disponible, ya que fue necesario contemplar tanto el diámetro de las tomas de presión como el diámetro externo de las mangueras que son conectadas a estas, ambos diámetros de 1.6 [mm]. Otro aspecto importante a considerar es la obstrucción en las mangueras que se genera al ser colocadas en espacios muy reducidos, lo cual también influyó en la cantidad y distribución de las tomas de presión.*

*Considerando lo anteriormente expuesto se realizaron un total de 144 tomas de presión, 72 por cada cara de la fila.*

*Tanto la fila instrumentada como las no instrumentadas, se colocaron sobre bases de madera MDF de 5 [mm], las cuales se integran a la sección **1A** de la cubierta mediante tornillos y vigas de madera, que hacen cumplir las características de separación e inclinación entre los paneles de cada fila; sin embargo, fue necesario realizar una pequeña modificación en la base de la fila instrumentada.*

*Esta modificación se realizó con la finalidad de que las mangueras conectadas a las tomas de presión, influyeran lo menos posible en las lecturas, por lo tanto, se tomó la decisión de realizar una pequeña perforación de 2 [mm] de espesor sobre la base de la fila instrumentada, de tal manera que todas las mangueras bajasen de la sección **1A** de la cubierta al interior del modelo de la edificación, en donde se llevaron a cabo las conexiones pertinentes para obtener las lecturas de presiones.*

*Esta perforación obligó a que la fila de paneles fotovoltaicos instrumentada se desplazase 2 [mm] sobre la cubierta, siendo ésta la única variación en cuanto a las características descritas anteriormente y quedando de la siguiente manera (Ilustración 29).*

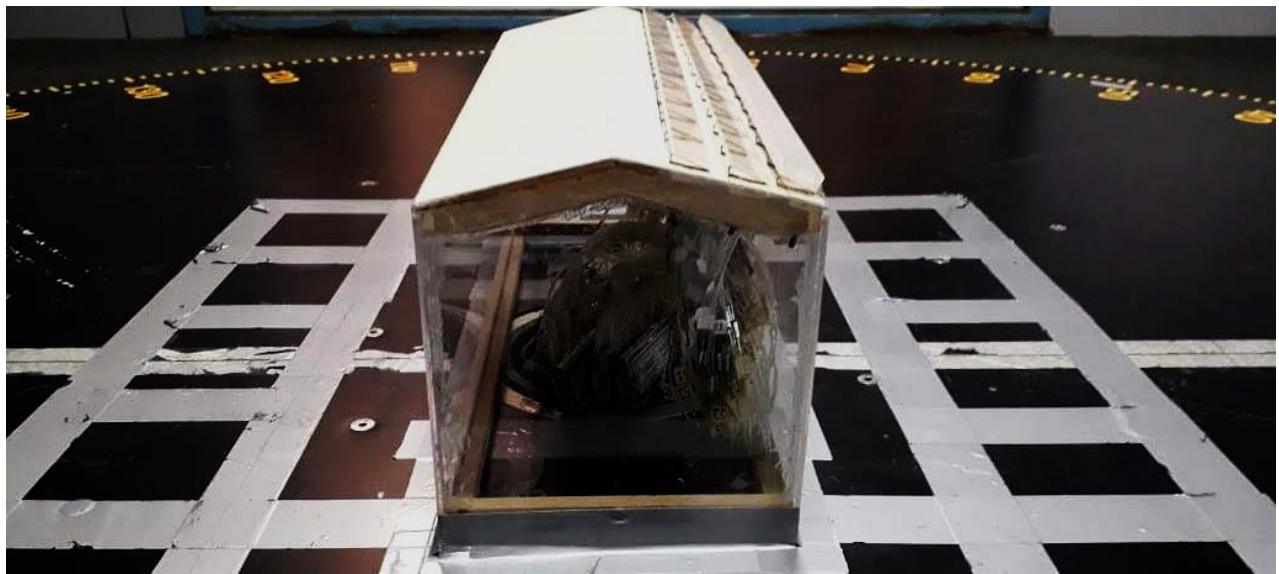


*Ilustración 29. Perforación de 2 [mm] de espesor en la base del modelo de fila de paneles fotovoltaicos instrumentada y separación entre los modelos de filas y el borde de la pared lateral **B** [elaboración propia].*

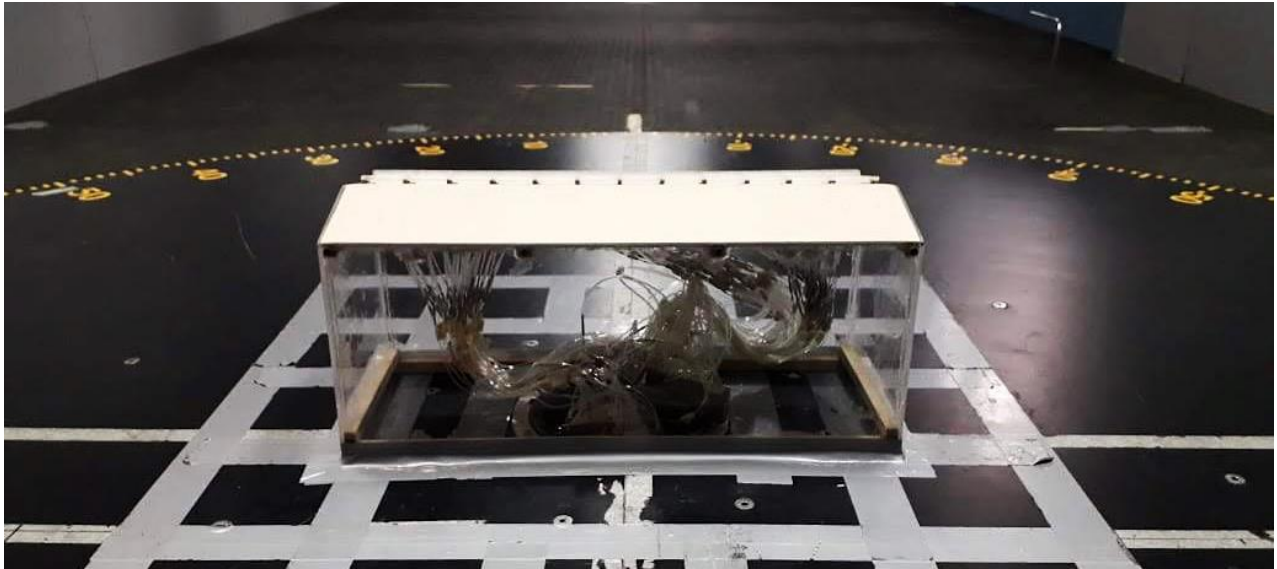
*En las ilustraciones 30, 31, 32 y 33, se muestran 4 vistas diferentes del modelo terminado, de igual manera se puede apreciar parte del equipo utilizado para la obtención de las lecturas.*



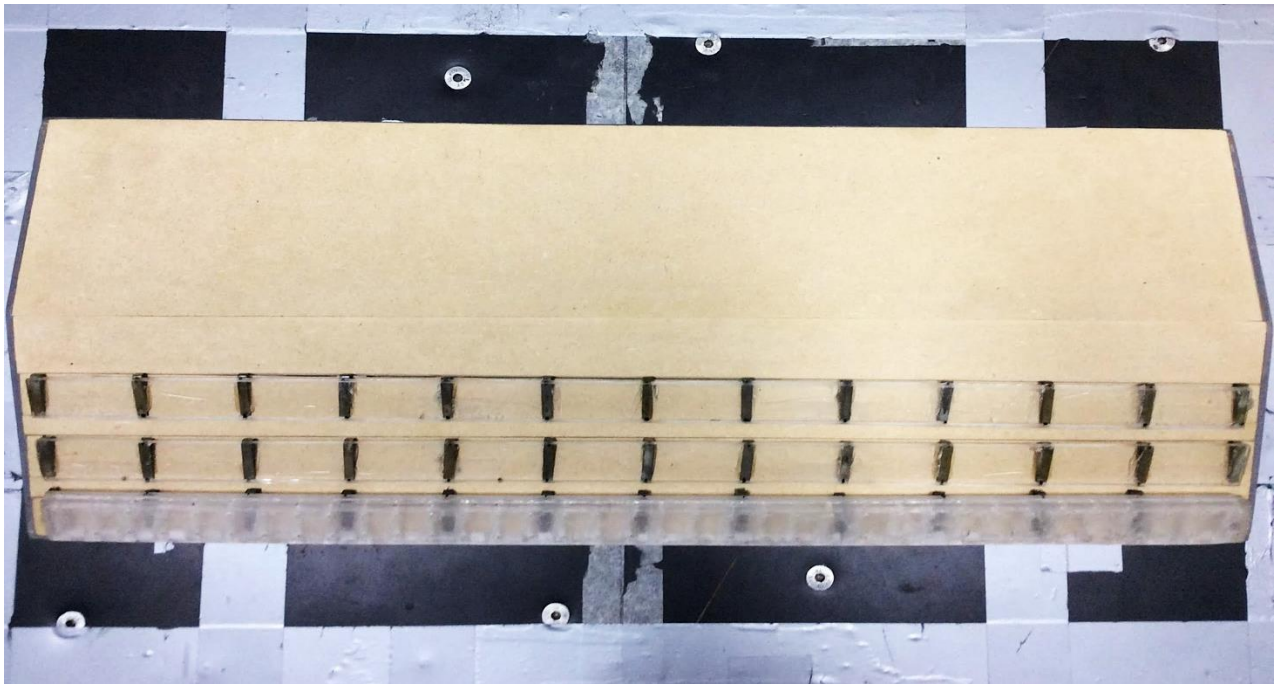
*Ilustración 30. Vista pared lateral A [elaboración propia].*



*Ilustración 31. Vista pared lateral D [elaboración propia].*



*Ilustración 32. Vista pared lateral C [elaboración propia].*



*Ilustración 33. Vista de cubierta, sección 1A y 2A [elaboración propia].*

### 3.4 Parámetros de similitud

*Al llevar a cabo cualquier prueba en un túnel de viento, para este caso de capa límite atmosférica de la UNAM, es deseable simular lo mejor posible las condiciones reales de la estructura y del medio que la rodea, esto con el objetivo de obtener la respuesta estructural acorde a la realidad ante las acciones del viento, por lo que son empleados principalmente los parámetros que se describen a continuación:*

#### *Escala geométrica*

*Este parámetro deberá ser tal que permita instrumentar y detallar lo mejor posible las características de la estructura, además según el ASCE No. 67 (1999), la relación de bloqueo entre el área del modelo proyectada a un plano perpendicular al flujo de viento y la sección transversal del túnel deberá ser igual o menor al 5 [%], esto con el objetivo de no generar distorsiones y aceleraciones del flujo alrededor del modelo y así evitar realizar correcciones.*

*La escala geométrica se define como el cociente de la longitud característica del modelo  $L_m$  y la longitud característica del prototipo  $L_p$ , como se muestra a continuación.*

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p}$$

*Como se mencionó anteriormente, con el propósito de aprovechar estudios previos en edificaciones bajas (Amaya-Gallardo, 2019), se utilizó el modelo de edificación baja de dos aguas con escala geométrica  $\lambda_L = \frac{1}{50}$  y una relación de bloqueo inferior al 5 [%].*

#### *Escala de tiempo*

*La escala de tiempo se define como el cociente del tiempo de medición en el modelo  $T_m$  y el tiempo de medición en el prototipo  $T_p$ , como se muestra a continuación.*

$$\lambda_T = \frac{T_m}{T_p}$$

Para este caso y por convención se empleó una escala de tiempo  $\lambda_T = \frac{3}{50}$ , además se consideró un tiempo de medición en el prototipo  $T_p = 10[\text{min}] = 600[\text{s}]$  por lo cual, el tiempo de medición en el modelo será  $T_m = 36[\text{s}]$ .

#### Escala de velocidad

Una vez definidas las escalas geométrica y de tiempo, la escala de velocidad puede ser obtenida de la siguiente manera.

$$\lambda_v = \frac{\lambda_L}{\lambda_T}$$

Por lo tanto, la escala de velocidad será  $\lambda_v = \frac{1}{3}$

Otra forma de definir a la escala de velocidad es como el cociente de la velocidad media a la que estará sometido el modelo a una altura de referencia y la velocidad media asociada a un tiempo de medición de 10 minutos en el prototipo a la altura de referencia a escala real, como se muestra a continuación.

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p}$$

Para este caso se propuso una velocidad media en el modelo  $V_m = 10 [\text{m/s}]$  a una altura de referencia de  $22.5 [\text{cm}]$ , sin el empleo de elementos rugosos ni generadores de vórtices y barrera, dando como resultado una velocidad media en el prototipo  $V_p = 30 [\text{m/s}] = 108 [\text{km/h}]$  a la altura de referencia a escala real.



### 3.5 Protocolo de las pruebas

*Las pruebas se llevaron a cabo considerando dos condiciones de categoría de terreno en la sección de prueba del túnel de viento de capa límite atmosférica de la UNAM, las cuales se especifican y muestran de manera resumida a continuación.*

*La primera de ellas consistió en simular un terreno categoría 1 (ilustración 34), esto se logró al no emplear ningún elemento rugoso ni generador de vórtices y barrera, de tal manera que el viento incidió directamente sobre el modelo.*



*Ilustración 34. Simulación de terreno categoría 1 [elaboración propia].*

*La segunda consideración consistió en simular un terreno categoría 4 (ilustración 35), empleando elementos rugosos, generadores de vórtices y barrera (Amaya-Gallardo, 2019).*

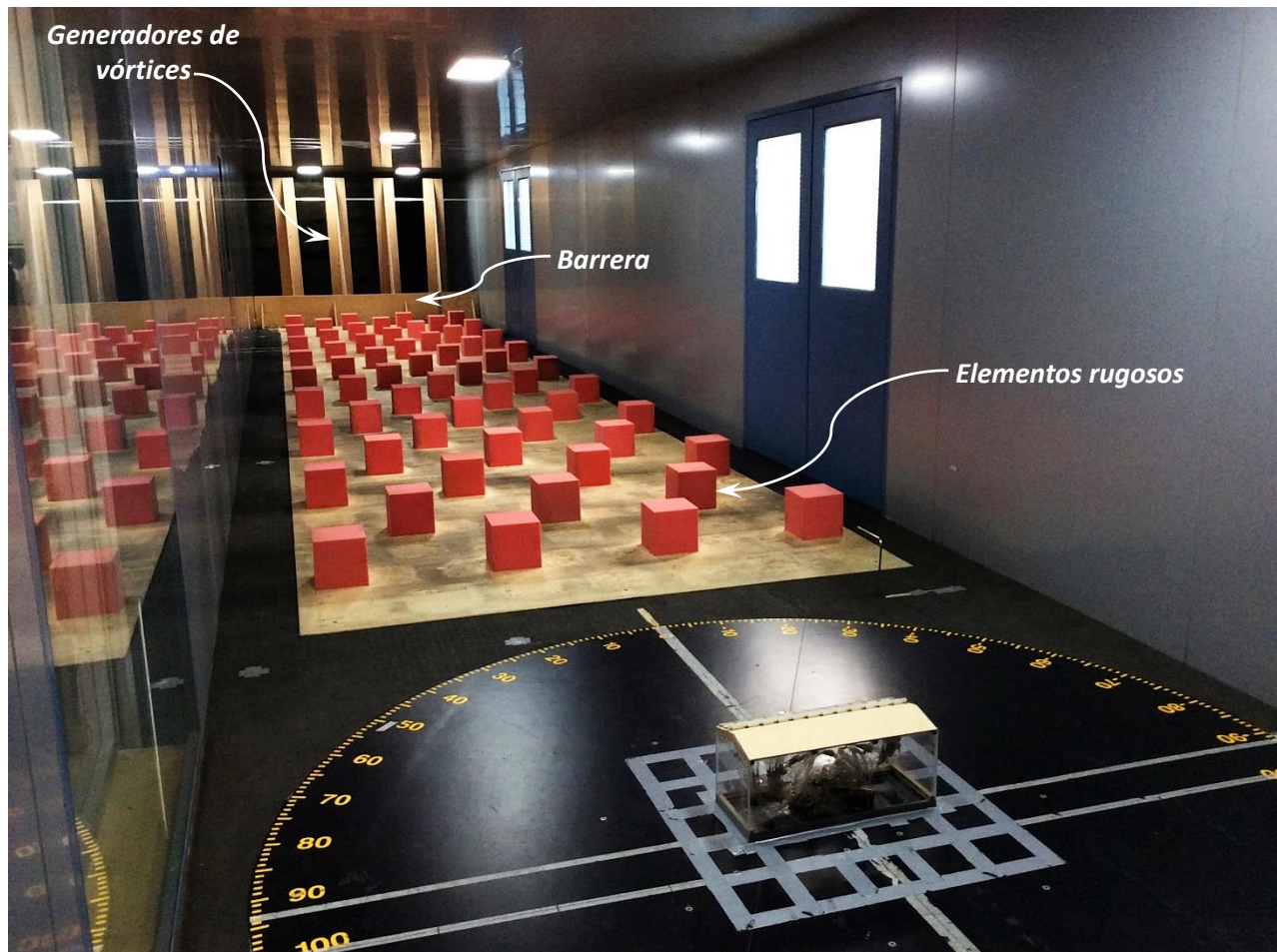


Ilustración 35. Simulación de terreno categoría 4 [elaboración propia].

Para la obtención de las lecturas de presiones en ambas caras de la fila instrumentada y para ambas consideraciones de la sección de prueba del túnel de viento de capa límite atmosférica de la UNAM, se emplearon las siguientes características principales:

El ventilador del túnel de viento trabajó a 280 [rpm], ya que a estas revoluciones se obtuvo una velocidad media de 10 [m/s] a una altura de referencia de 22.5 [cm], sin ningún elemento rugoso ni generador de vórtices y barrera.

Se utilizó una frecuencia  $f_s = 312.5$  [Hz] para la obtención de las lecturas de presiones.

Aprovechando la simetría geométrica del modelo, sólo fue necesario hacer una rotación del mismo de 180° (ilustración 36), para así poder caracterizar su comportamiento ante efectos del viento. En dicha rotación se obtuvieron lecturas de presiones con variaciones

de  $10^\circ$  hasta llegar a los  $180^\circ$ , contemplando de igual manera los ángulos de  $45^\circ$  y  $135^\circ$  e iniciando con un ángulo de incidencia del viento de  $0^\circ$ , dando un total de 21 ángulos por rotación sobre los cuales se realizaron lecturas. De igual manera cabe destacar que con el propósito de tener una amplia base de lecturas de presiones, la rotación del modelo se llevó a cabo un total de 10 veces por posición de fila instrumentada, ya que como se mencionó anteriormente sólo se instrumentó uno de los modelos de fila de paneles fotovoltaicos, por lo que dicho modelo tuvo que tomar las posiciones tanto de la fila 1 como fila 2 y fila 3 (ilustración 26).

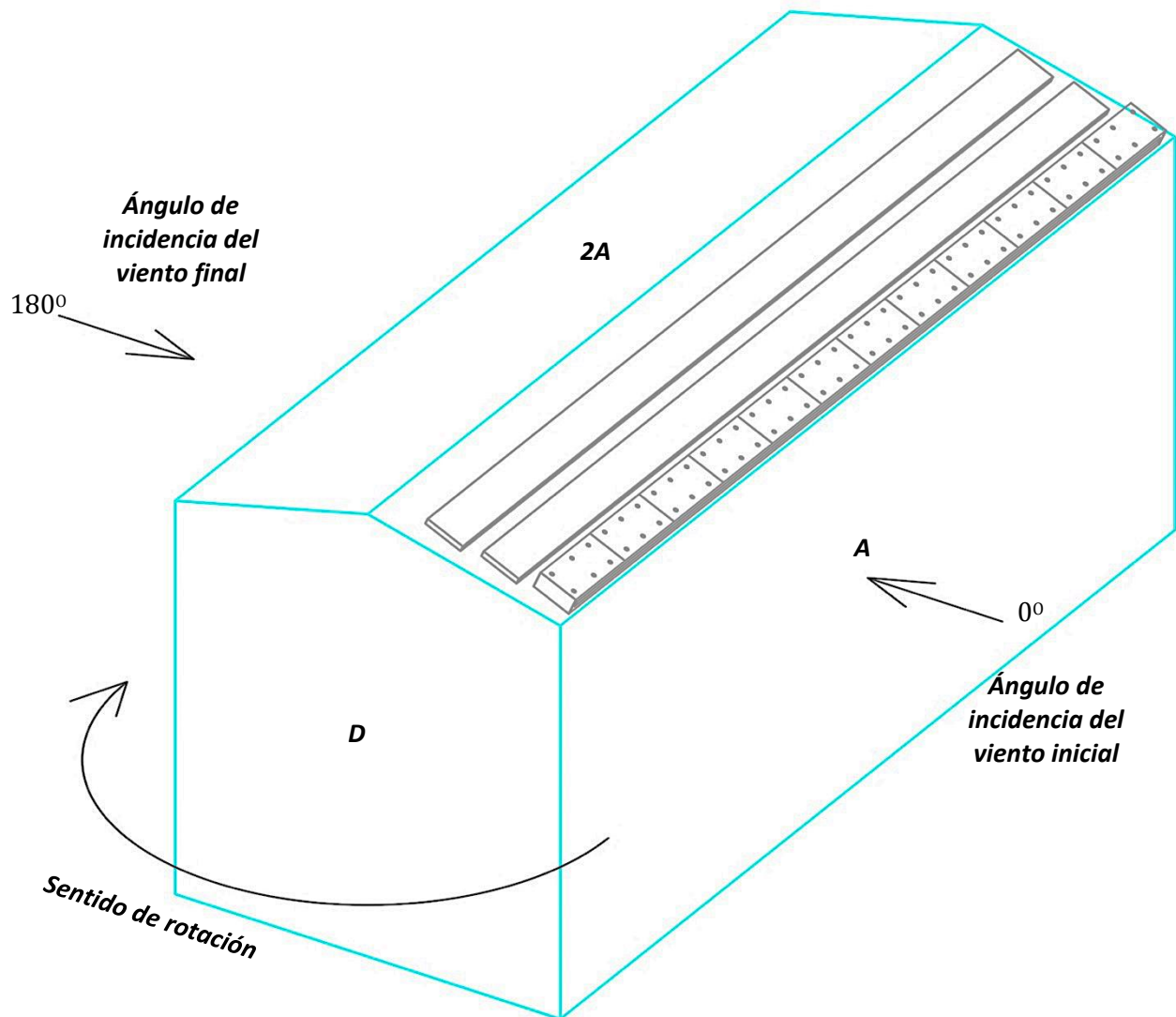


Ilustración 36. Rotación del modelo en estudio para su caracterización ante efectos del viento [elaboración propia].

*Cada lectura de las presiones, efectuada en los 21 ángulos de la rotación del modelo, tuvo un tiempo de duración de 45[s], este tiempo mayor al necesario  $T_m = 36[s]$  con el objetivo de dar un tiempo de estabilización a los equipos de lectura.*

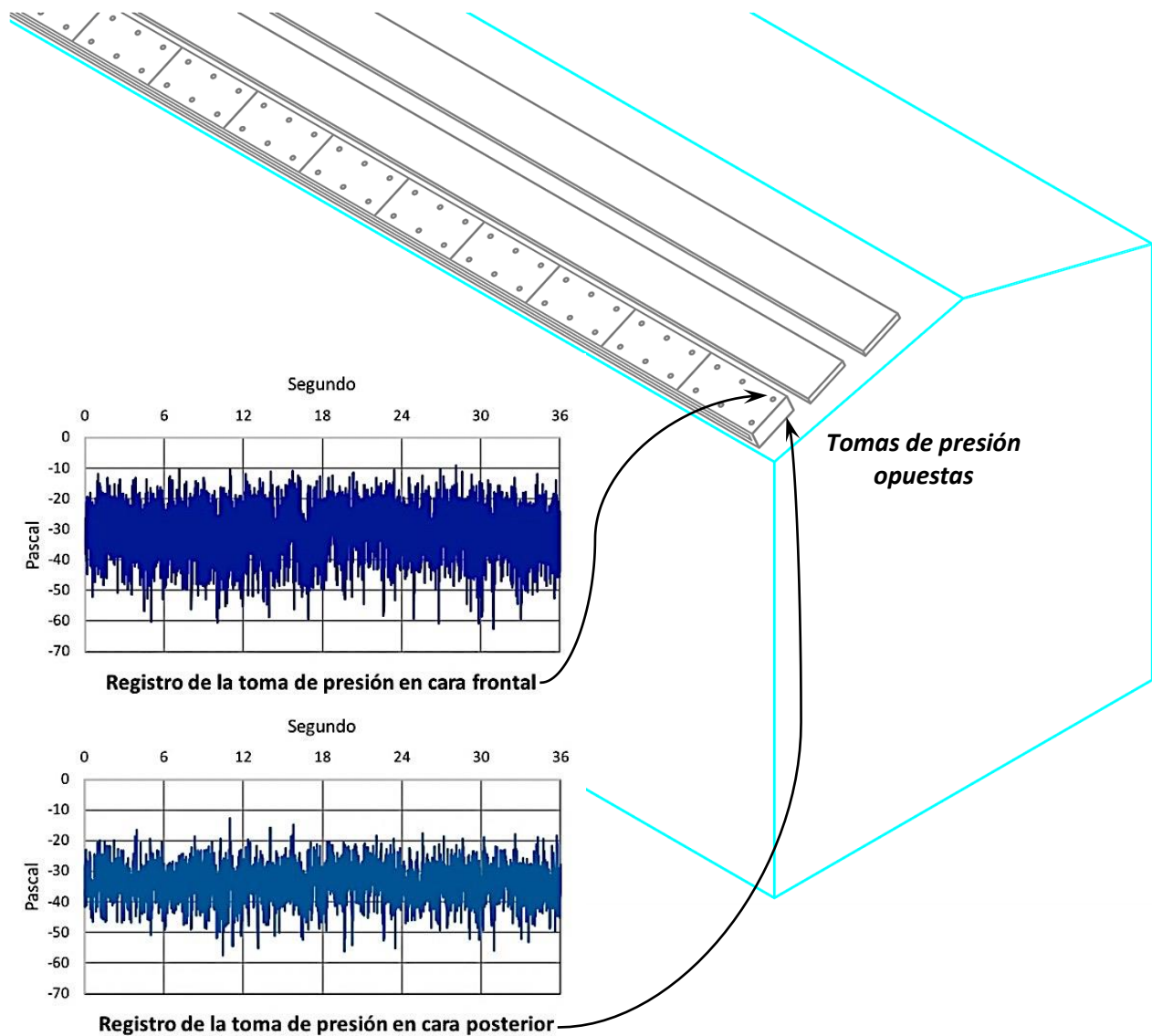
*De igual manera se otorgó un tiempo de estabilización del flujo del viento de 20[s], tras los cambios graduales de la rotación.*

#### **Capítulo 4. Procesamiento de la información, resultados y análisis**

##### **4.1 Procesamiento de la información para ambas simulaciones de categoría de terreno**

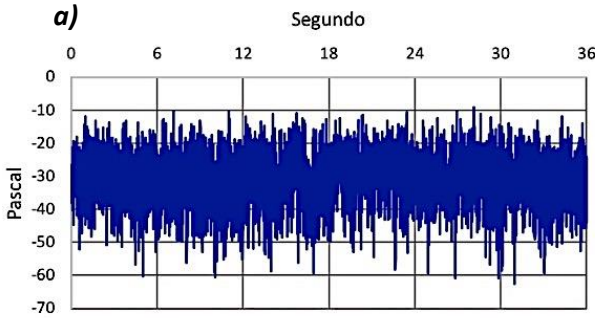
*Al realizar la lectura de presiones en cada cambio gradual de la rotación y categoría de terreno simulado, se obtuvo un registro tiempo-presión por cada una de las tomas de presión en ambas caras de la fila instrumentada. Con dichos registros y debido a que las tomas de presión tienen la misma distribución en ambas caras de la fila, fue posible determinar registros de presiones netas y sus respectivos registros de coeficientes de presión neta para cada par de tomas de presión opuestas, como se resume a continuación en un ejemplo.*

*Para cada par de tomas de presión opuestas, se obtuvieron los registros tiempo-presión correspondientes a cada lectura realizada en cada cambio gradual de la rotación y simulación de categoría de terreno (ilustración 37).*

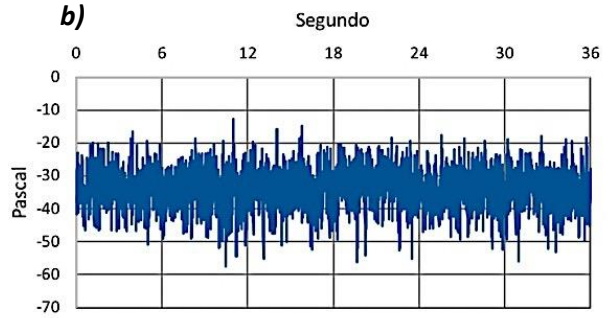


*Ilustración 37. Ejemplo de registros tiempo-presión de tomas de presión opuestas, para un ángulo de incidencia del viento de  $0^\circ$  y simulación de terreno categoría 1 [elaboración propia].*

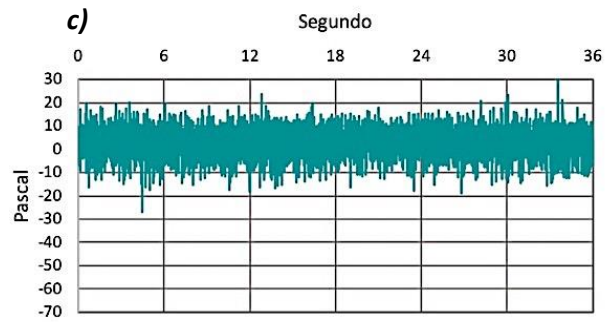
*Con estos registros y considerando a las presiones positivas con sentido panel-edificación, se determinó el registro de presiones netas mediante la diferencia de los registros de la toma de presión en la cara frontal y la cara posterior, respectivamente (ilustración 38).*



**Registro de la toma de presión en cara frontal**



**Registro de la toma de presión en cara posterior**



**Registro de presiones netas**

*Ilustración 38. Registro de presiones netas “c)” obtenido mediante la diferencia del Registro de la toma de presión en cara frontal “a)” y el Registro de la toma de presión en cara posterior “b)”, para un ángulo de incidencia de viento de 0° y simulación de terreno categoría 1 [elaboración propia].*

*Posteriormente se obtuvo la presión dinámica media del flujo libre, es decir fuera de cualquier perturbación creada por el modelo, que se presentó para cada simulación de categoría de terreno a una altura de referencia de 22.5 [cm].*

*Para el caso de la simulación de terreno categoría 1, se empleó un tubo Pitot con el cual se obtuvieron registros de la presión total y estática del flujo libre para cada lectura realizada. Con estos registros y sabiendo que la presión dinámica se obtiene mediante la diferencia de la presión total y la estática, se determinó el registro de la presión dinámica correspondiente.*

*Al obtener los registros de la presión total y estática, y al determinar el registro de la presión dinámica, todos ellos del flujo libre, se observó que el comportamiento de estos registros para todas las lecturas realizadas fue semejante. A continuación se muestra un registro representativo de las presiones y se resumen los valores medios determinados considerando todos los datos obtenidos (ilustración 39).*

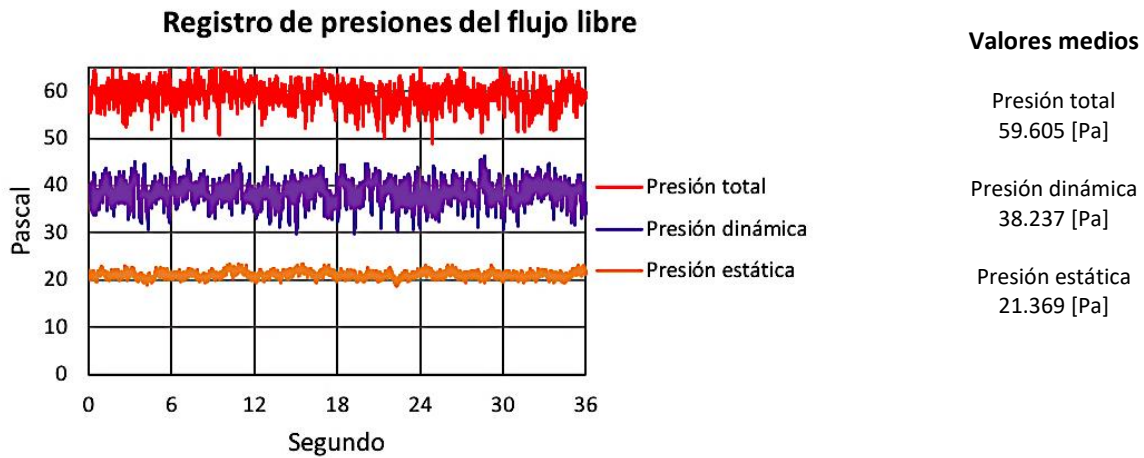
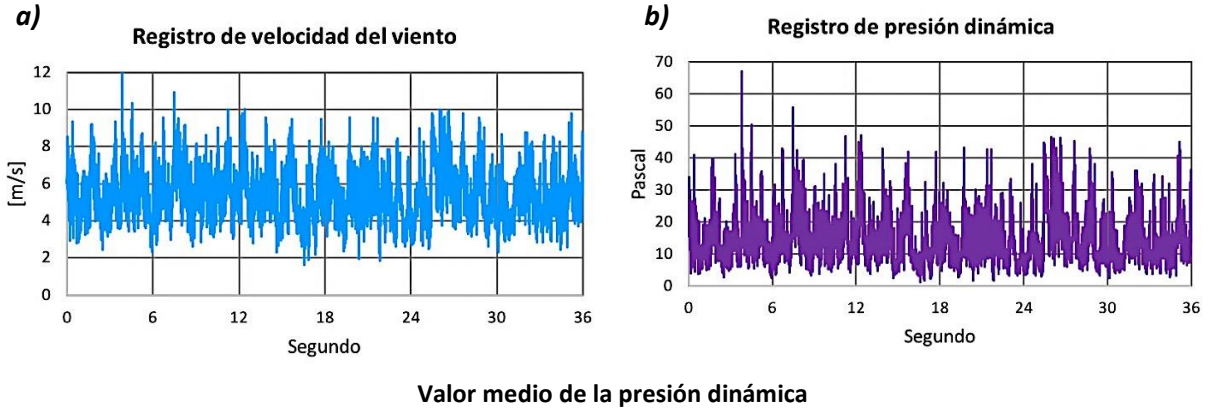


Ilustración 39. Registro representativo de las presiones del flujo libre del viento para la simulación de terreno categoría 1 y los valores medios determinados [elaboración propia].

Para la simulación de terreno categoría 4, se utilizó un anemómetro de hilo caliente para la obtención de registros de velocidad del viento, con estos registros y calculando la densidad del viento bajo las condiciones experimentales, se determinaron los registros de presión dinámica correspondientes, en donde la presión dinámica es igual a un medio de la densidad por la velocidad al cuadrado ( $\frac{1}{2}\rho V^2$ ).

A continuación, se muestra un registro representativo de la velocidad del viento a la altura de referencia y a la par su registro de presión dinámica correspondiente, determinado con una densidad del viento experimental de 0.938 [kg/m<sup>3</sup>]. De igual manera se resume el valor medio de la presión dinámica determinado considerando todos los datos obtenidos (ilustración 40).



14.392 [Pa]

*Ilustración 40. Registros representativos de la velocidad del viento “a)” y su respectiva presión dinámica “b)” para la simulación de terreno categoría 4 [elaboración propia].*

*Con los registros de presiones netas correspondientes a cada simulación de categoría de terreno y el respectivo valor medio de la presión dinámica, se determinaron registros de coeficientes de presión neta, mediante la división de todos los datos de cada registro de presiones netas con el respectivo valor medio de la presión dinámica, para los 21 ángulos de incidencia del viento y su respectiva simulación de categoría de terreno, como se muestra a continuación (ilustración 41).*



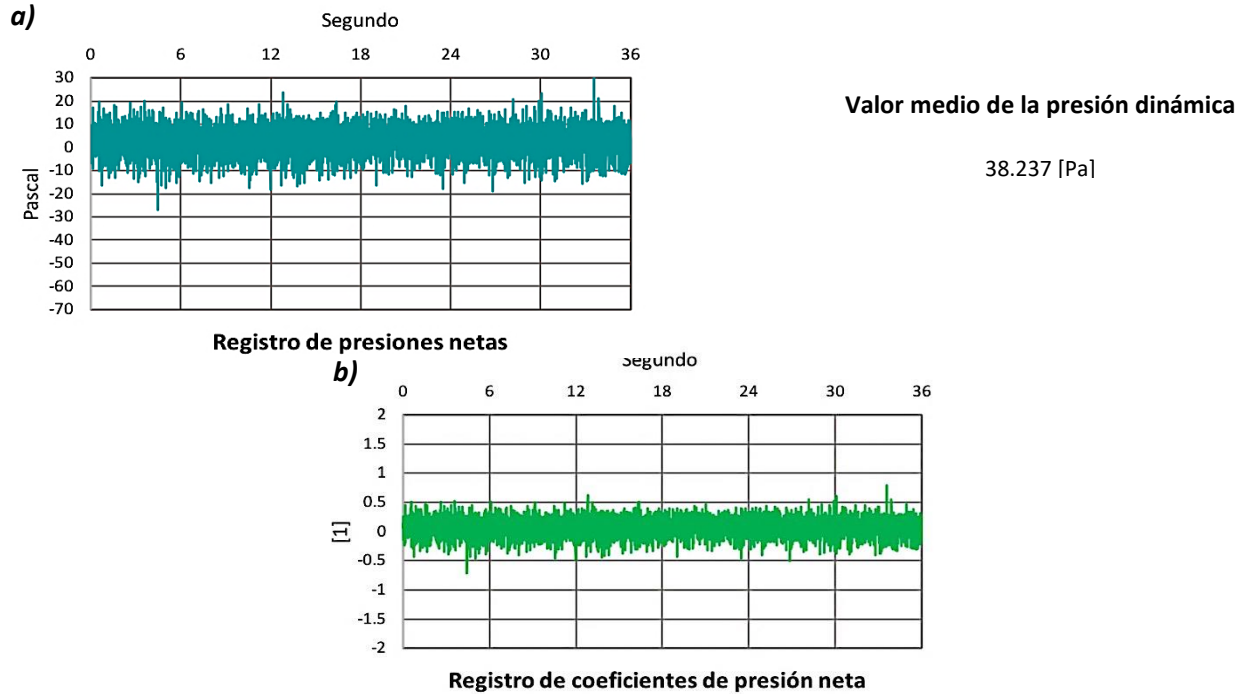


Ilustración 41. Obtención del registro de coeficientes de presión neta "b)" mediante la división de todos los datos del registro de presiones netas "a)" y el respectivo valor medio de la presión dinámica, para un ángulo de incidencia del viento de  $0^{\circ}$  y simulación de terreno categoría 1 [elaboración propia].

Considerando todos los datos de los registros de coeficientes de presión neta, para cada ángulo de incidencia del viento y categoría de terreno simulado, se determinaron los valores medio, pico máximo y pico mínimo.

Todo el procesamiento de la información descrito anteriormente en el ejemplo, para la obtención de los valores medio, pico máximo y pico mínimo, correspondientes a cada par de tomas de presión opuestas, para cada ángulo de incidencia del viento y categoría de terreno simulado, se realizó con MATLAB.

#### 4.2 Resultados de la prueba experimental

Una vez obtenidos los valores medio, pico máximo y pico mínimo de cada par de tomas de presión opuestas, se utilizó el programa Surfer para obtener los respectivos mapas de isolíneas de coeficientes de presión neta, para cada ángulo de incidencia del viento y categoría de terreno simulado, de tal manera que se pudiese observar gráficamente el efecto generado por el viento sobre los paneles fotovoltaicos. A continuación, se muestran sólo algunos mapas de los efectos generados por el viento sobre los paneles, estos mapas contemplan los ángulos de incidencia del viento de  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$  y  $180^{\circ}$ , de los

coeficientes de presión neta medios, picos máximos y picos mínimos para ambas simulaciones de categoría de terreno.

#### 4.2.1 Resultados de la simulación de terreno categoría 1

Coeficientes de presión neta, valores medios ( $C_{pn\_m}$ )

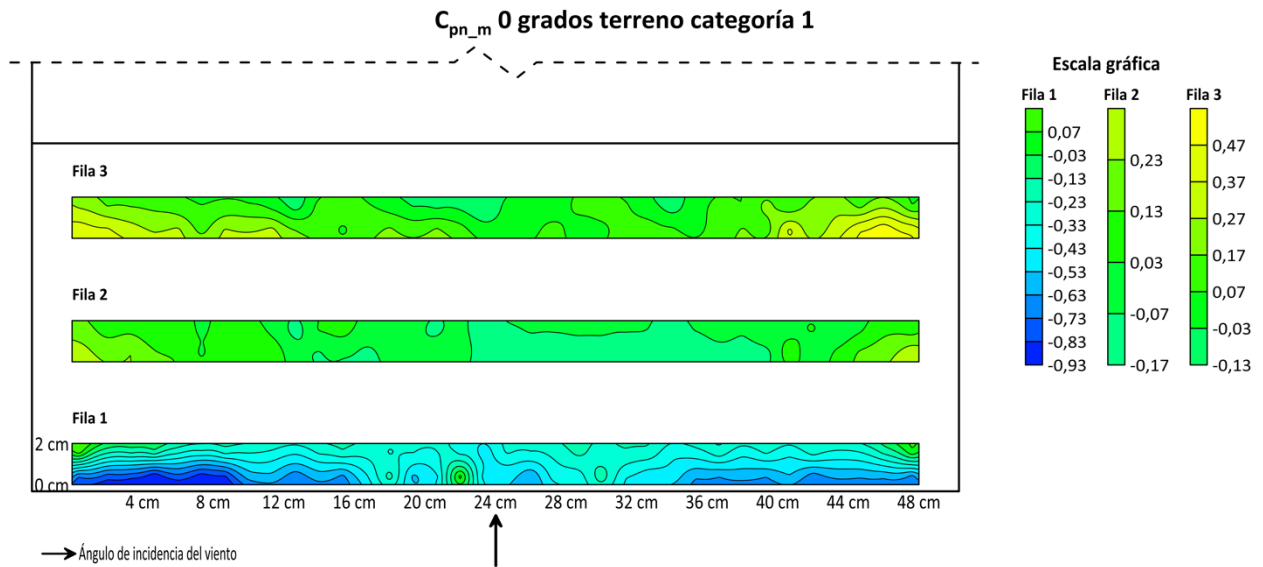


Ilustración 42. Coeficientes de presión neta medios, para un ángulo de incidencia del viento de  $0^\circ$  y terreno categoría 1 [elaboración propia].

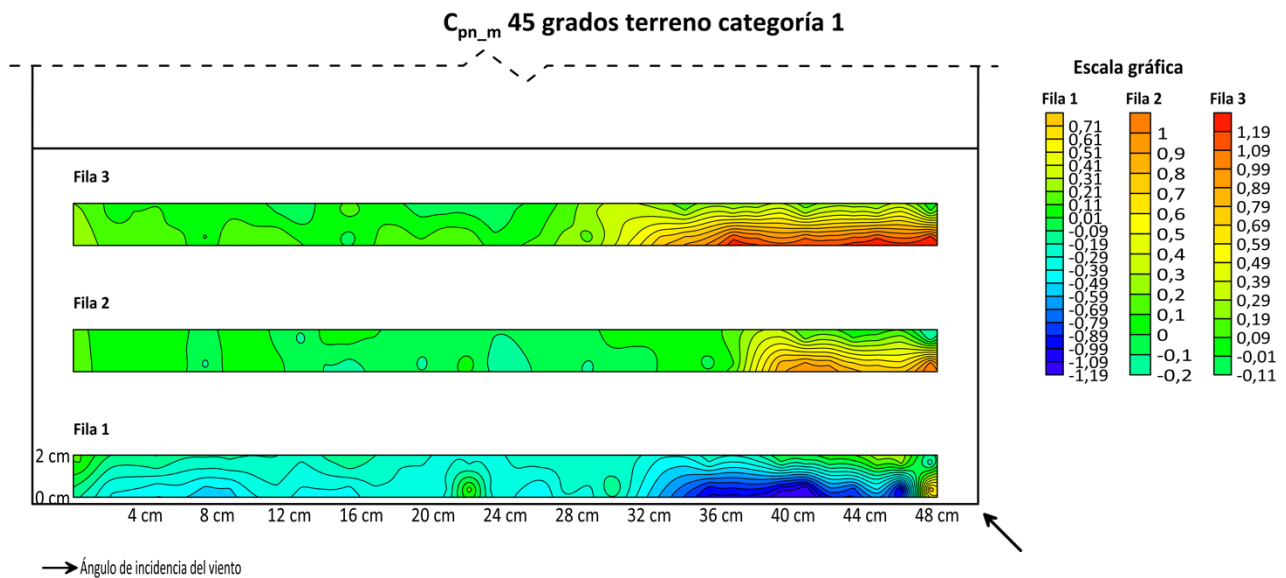


Ilustración 43. Coeficientes de presión neta medios, para un ángulo de incidencia del viento de  $45^\circ$  y terreno categoría 1 [elaboración propia].

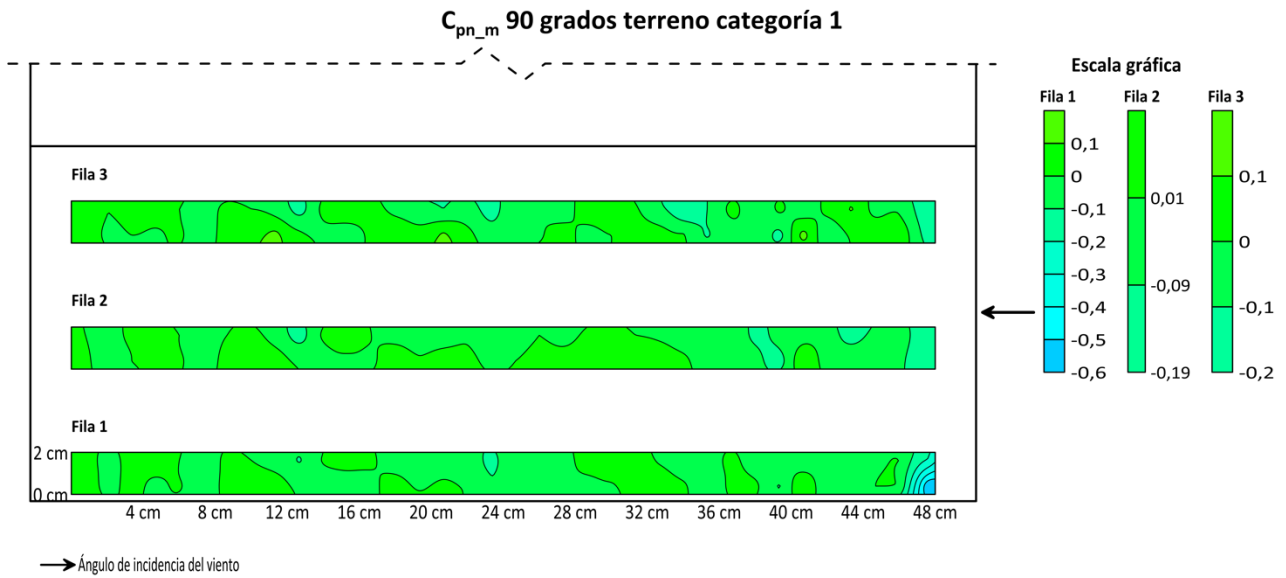


Ilustración 44. Coeficientes de presión neta medios, para un ángulo de incidencia del viento de 90° y terreno categoría 1 [elaboración propia].

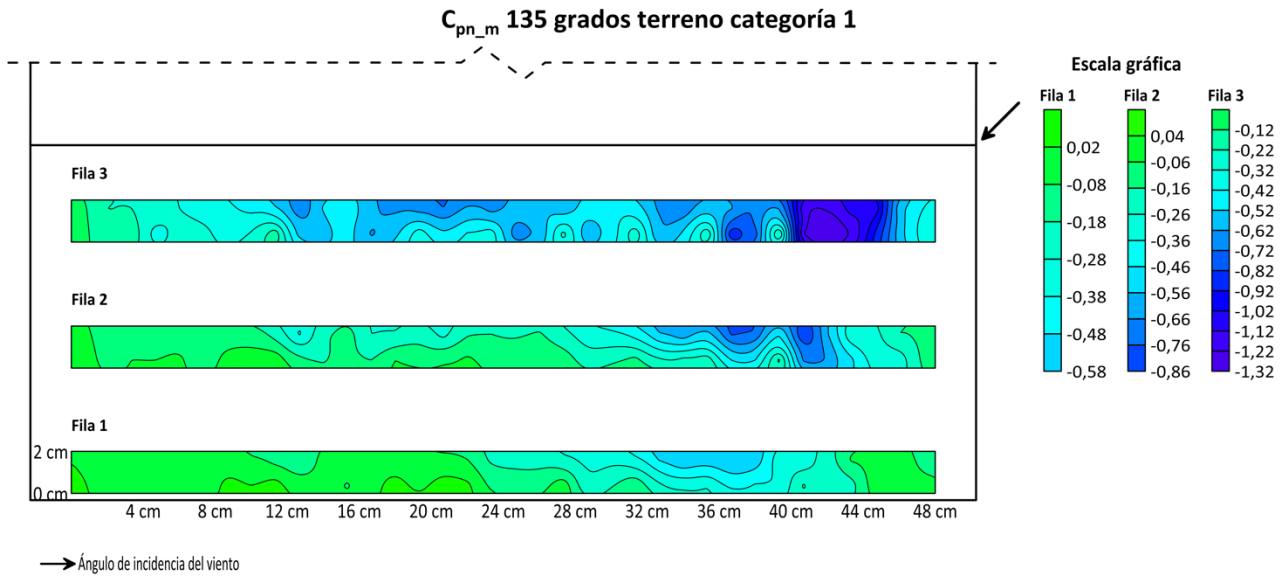


Ilustración 45. Coeficientes de presión neta medios, para un ángulo de incidencia del viento de 135° y terreno categoría 1 [elaboración propia].

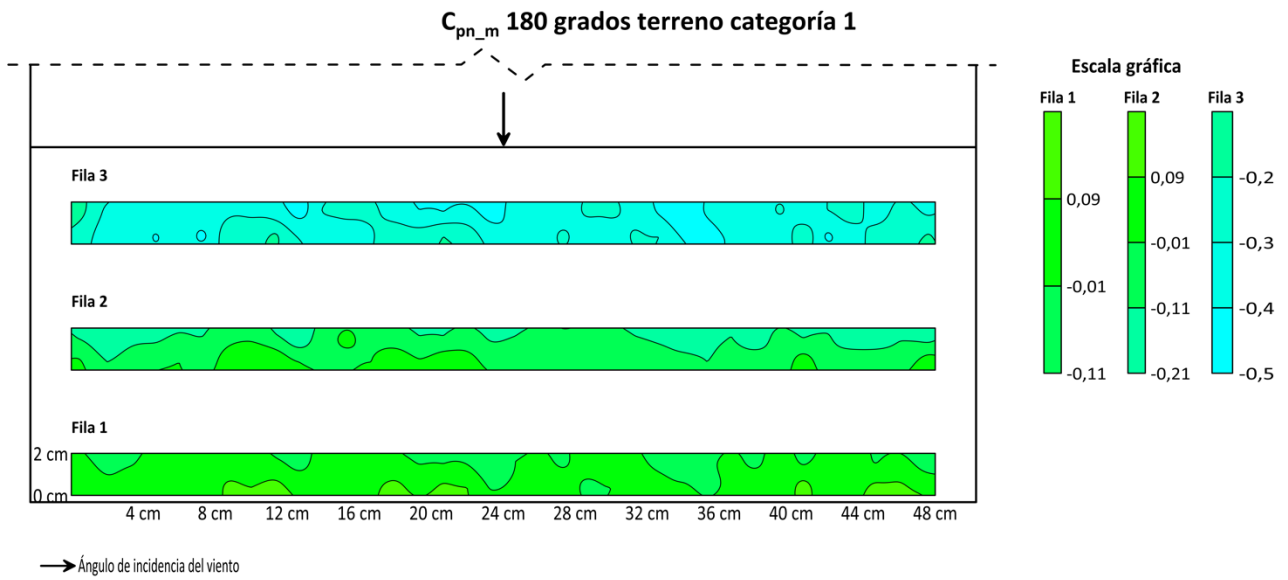


Ilustración 46. Coeficientes de presión neta medios, para un ángulo de incidencia del viento de 180° y terreno categoría 1 [elaboración propia].

Nota: Mapas completos en apéndice A.

### Coeficientes de presión neta, valores picos máximos ( $C_{pn\_pmax}$ )

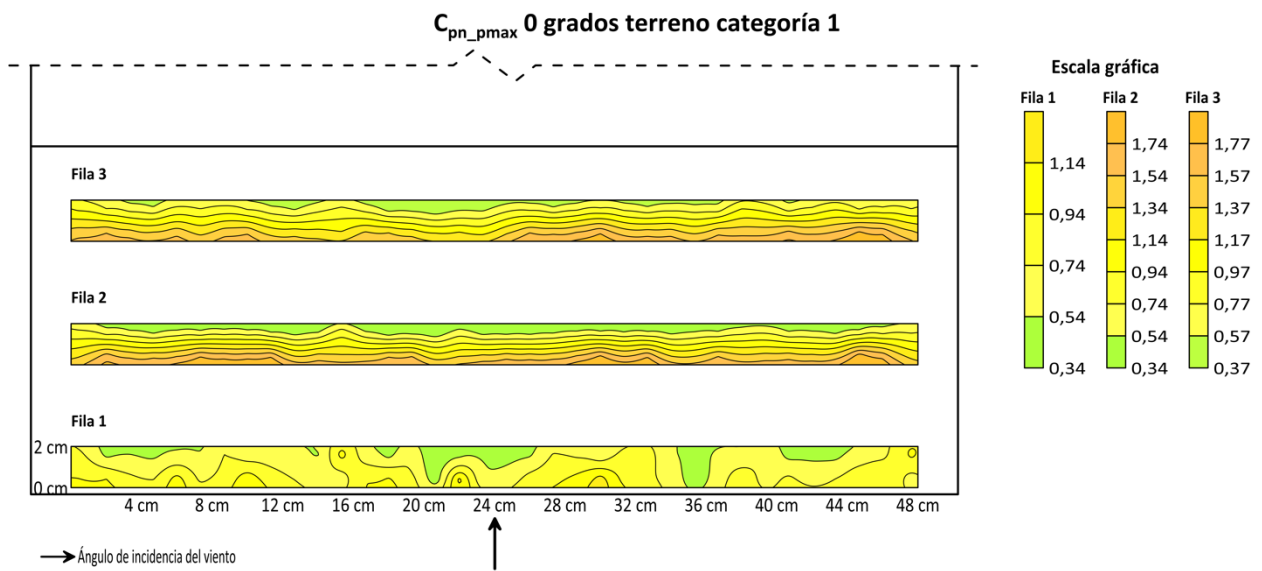


Ilustración 47. Coeficientes de presión neta picos máximos, para un ángulo de incidencia del viento de 0° y terreno categoría 1 [elaboración propia].

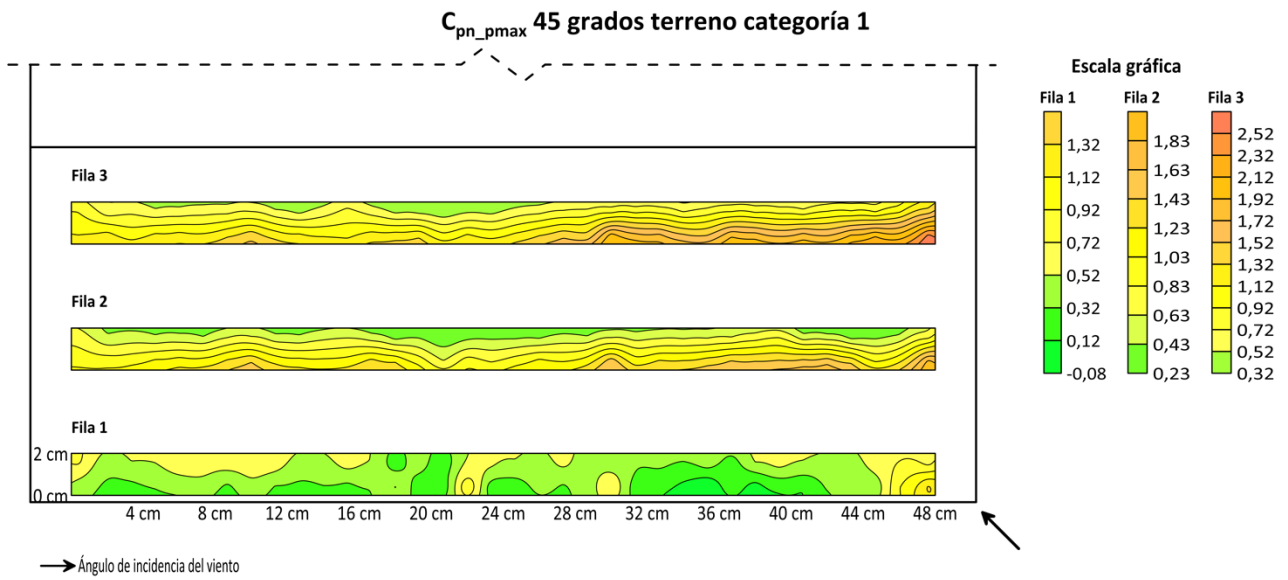


Ilustración 48. Coeficientes de presión neta picos máximos, para un ángulo de incidencia del viento de 45° y terreno categoría 1 [elaboración propia].

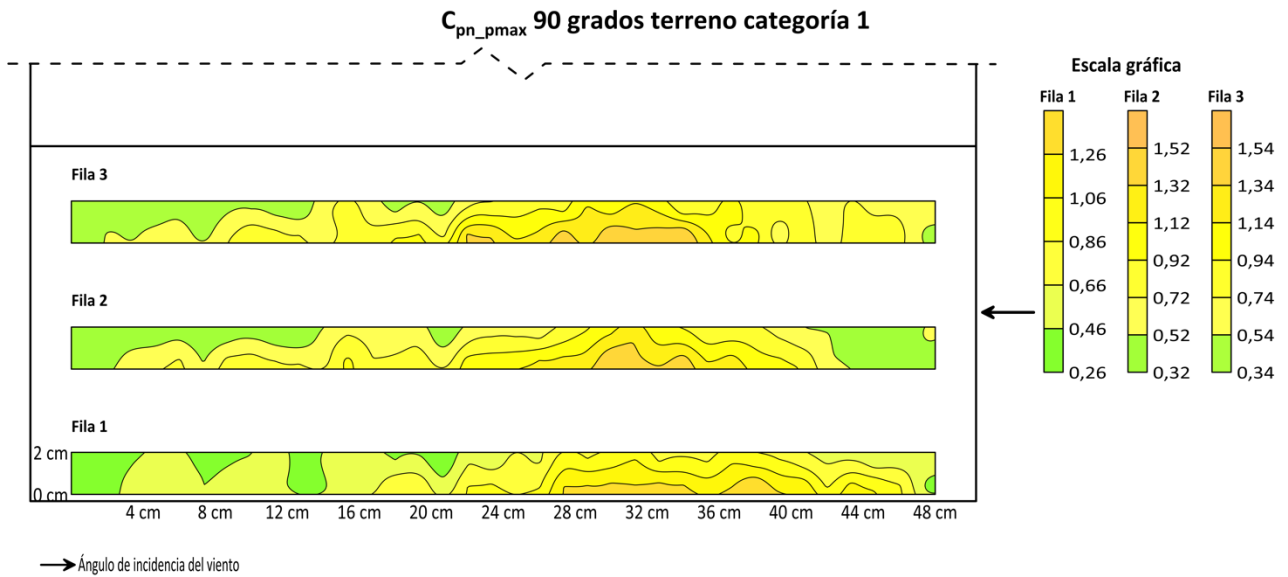


Ilustración 49. Coeficientes de presión neta picos máximos, para un ángulo de incidencia del viento de 90° y terreno categoría 1 [elaboración propia].

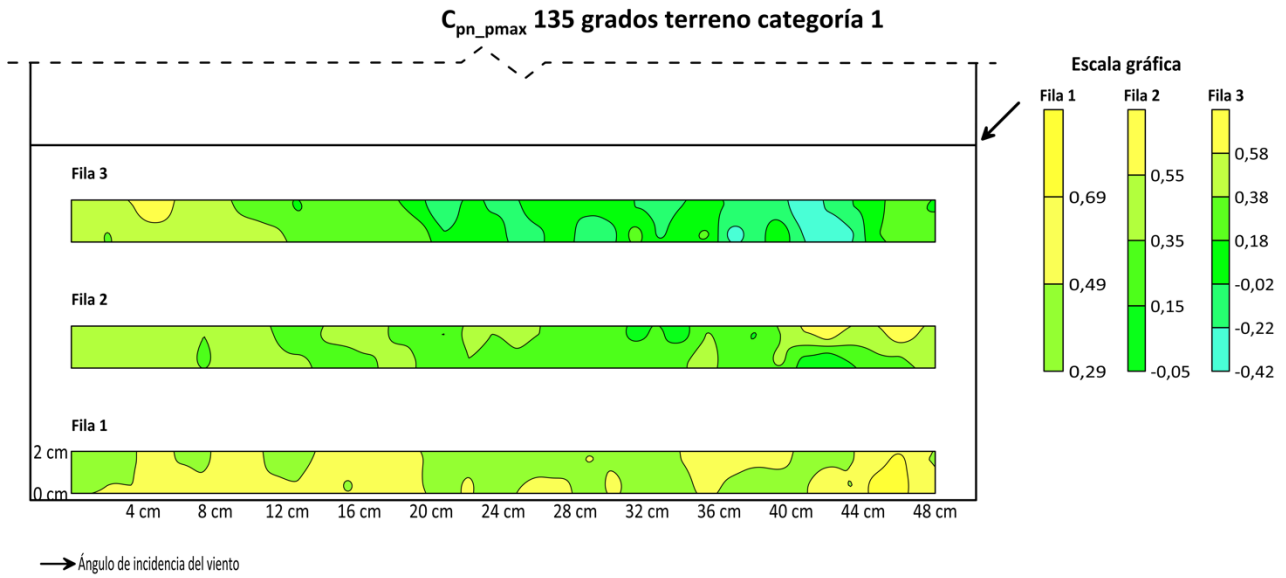


Ilustración 50. Coeficientes de presión neta picos máximos, para un ángulo de incidencia del viento de 135° y terreno categoría 1 [elaboración propia].

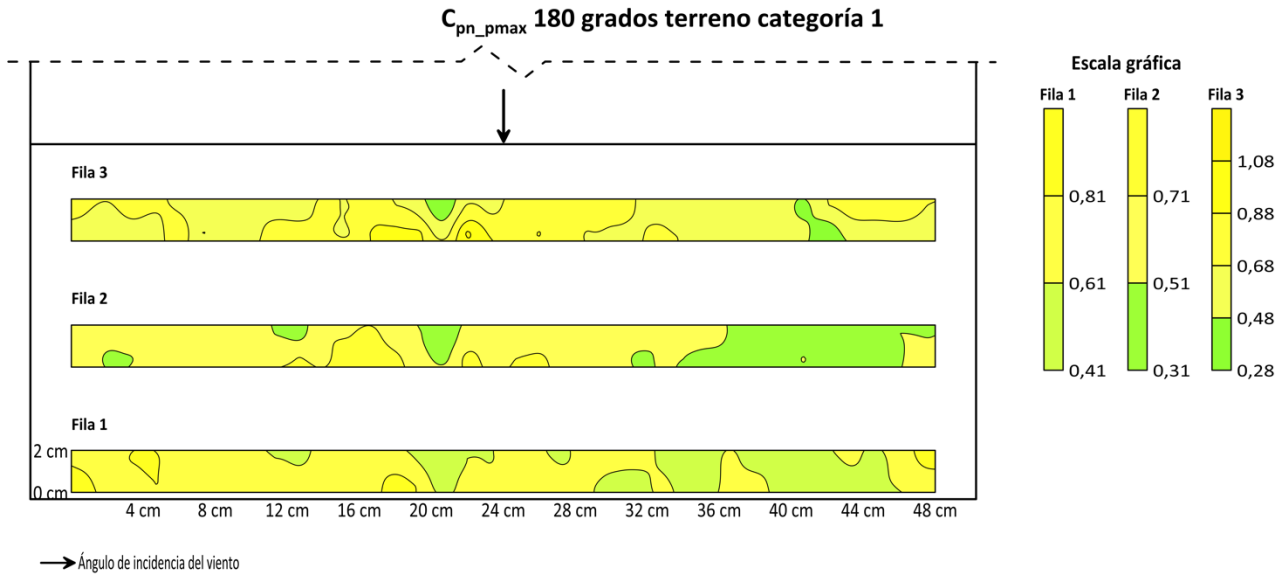


Ilustración 51. Coeficientes de presión neta picos máximos, para un ángulo de incidencia del viento de 180° y terreno categoría 1 [elaboración propia].

Nota: Mapas completos en apéndice B.

Coeficientes de presión neta, valores picos mínimos ( $C_{pn\_pmin}$ )

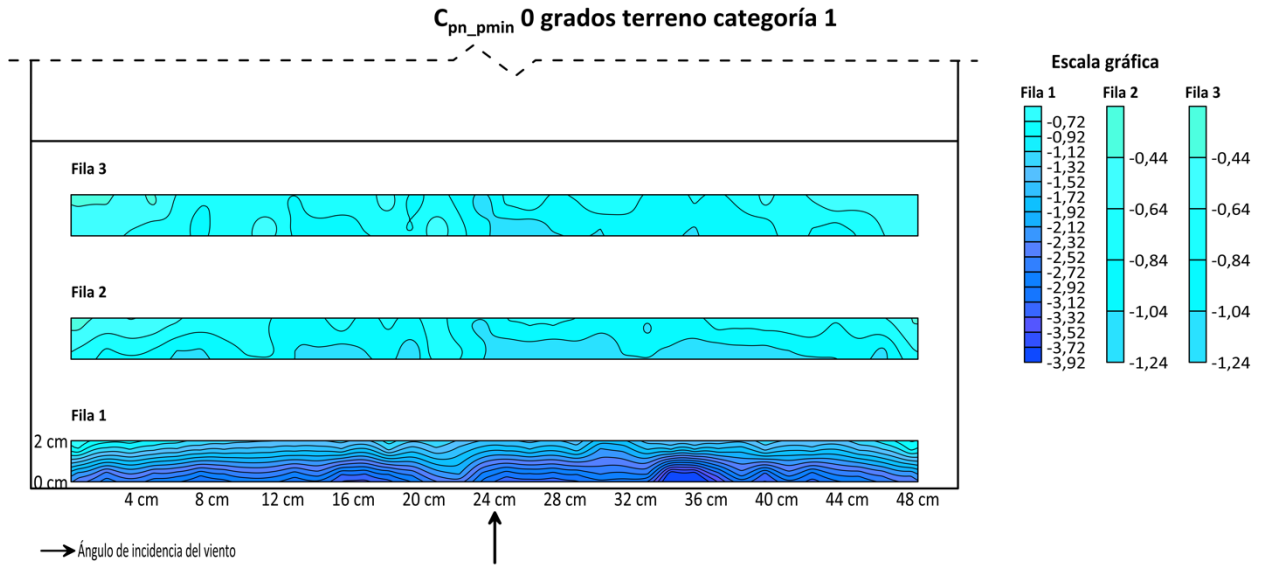


Ilustración 52. Coeficientes de presión neta picos mínimos, para un ángulo de incidencia del viento de  $0^{\circ}$  y terreno categoría 1 [elaboración propia].

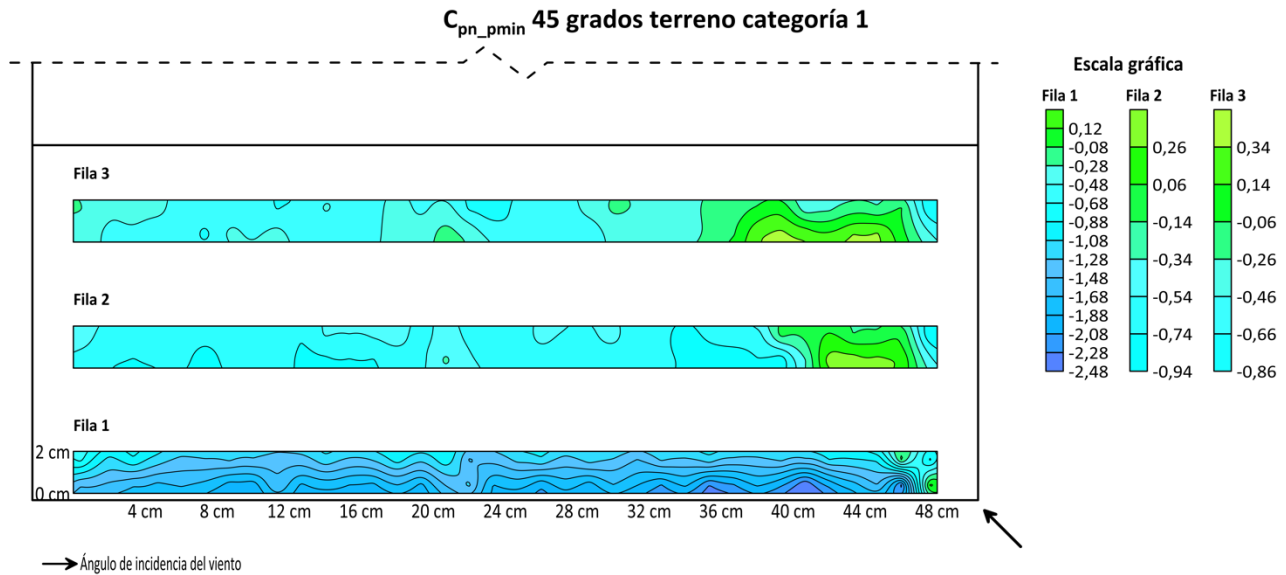


Ilustración 53. Coeficientes de presión neta picos mínimos, para un ángulo de incidencia del viento de  $45^{\circ}$  y terreno categoría 1 [elaboración propia].

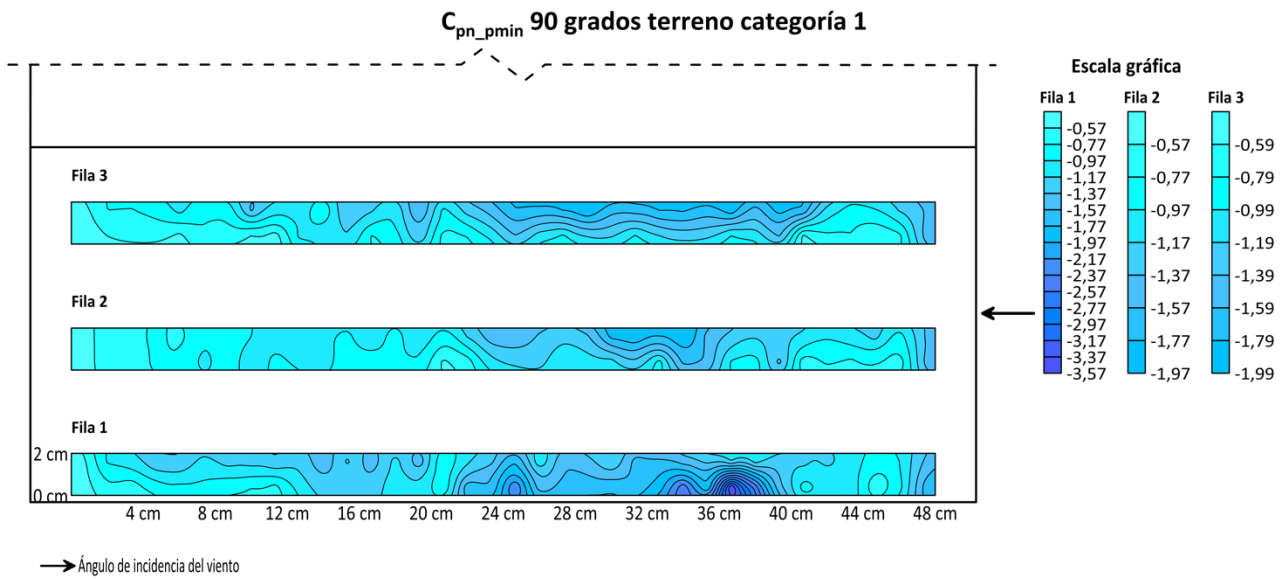


Ilustración 54. Coeficientes de presión neta picos mínimos, para un ángulo de incidencia del viento de 90° y terreno categoría 1 [elaboración propia].

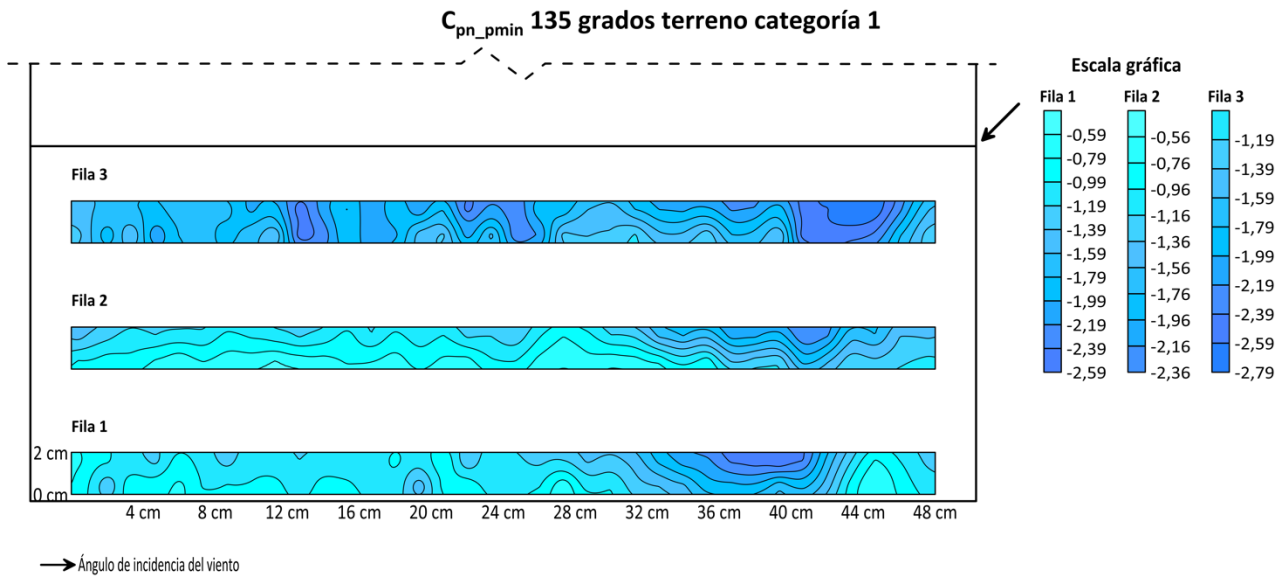


Ilustración 55. Coeficientes de presión neta picos mínimos, para un ángulo de incidencia del viento de 135° y terreno categoría 1 [elaboración propia].



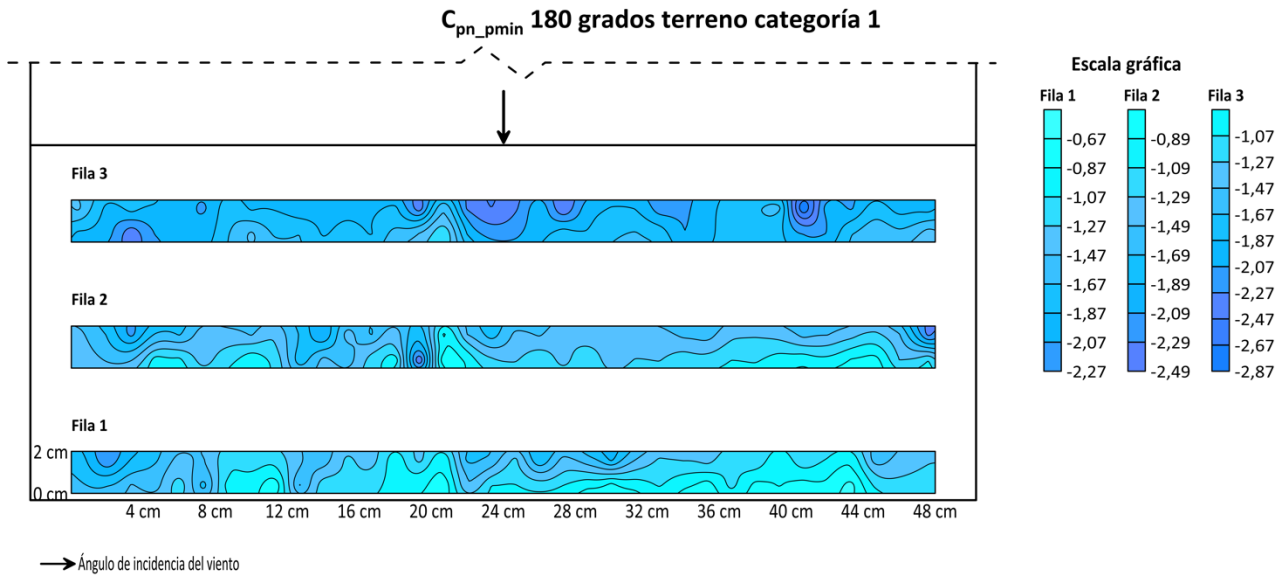


Ilustración 56. Coeficientes de presión neta picos mínimos, para un ángulo de incidencia del viento de 180° y terreno categoría 1 [elaboración propia].

Nota: Mapas completos en apéndice C.

#### 4.2.2 Resultados de la simulación de terreno categoría 4

Coeficientes de presión neta, valores medios ( $C_{pn\_m}$ )

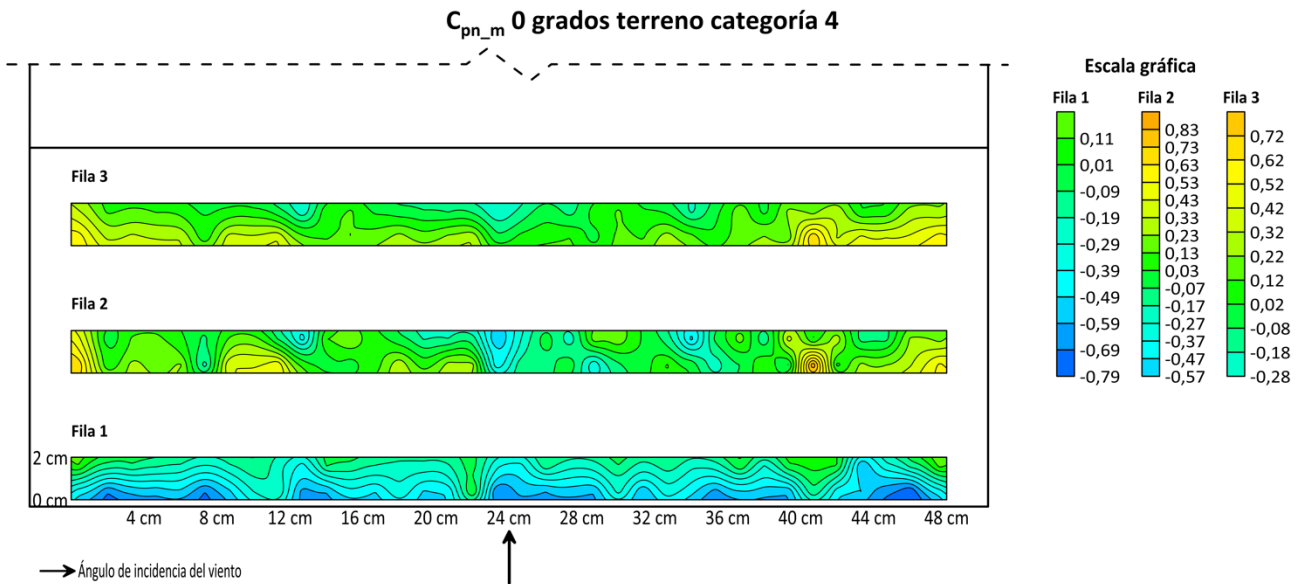


Ilustración 57. Coeficientes de presión neta medios, para un ángulo de incidencia del viento de 0° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

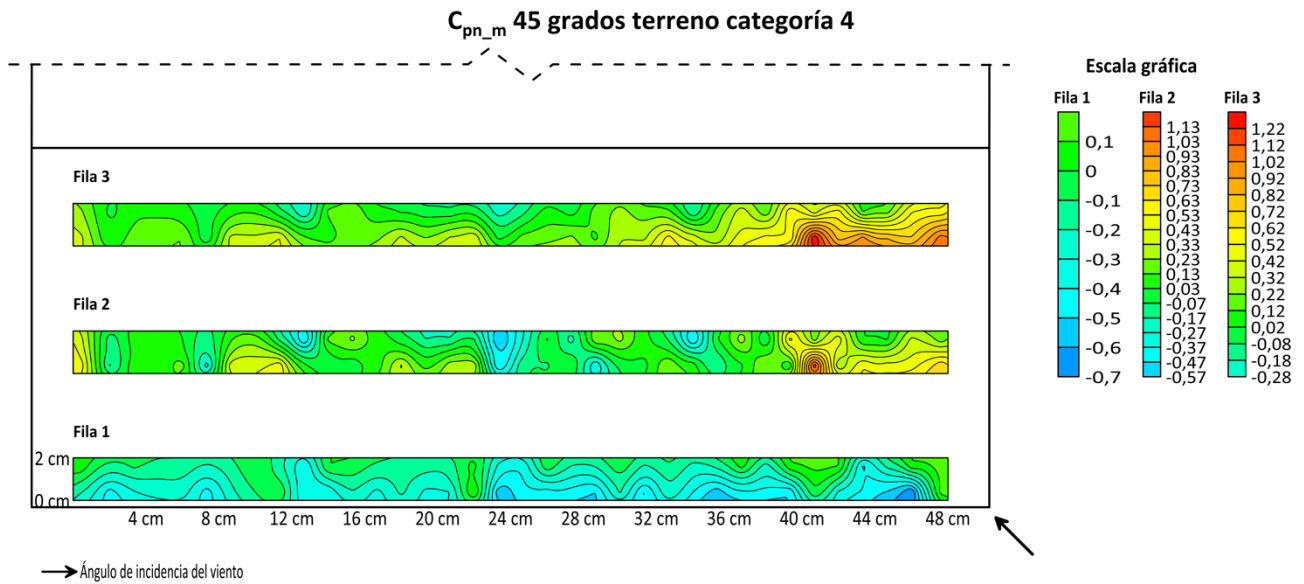


Ilustración 58. Coeficientes de presión neta medios, para un ángulo de incidencia del viento de 45° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

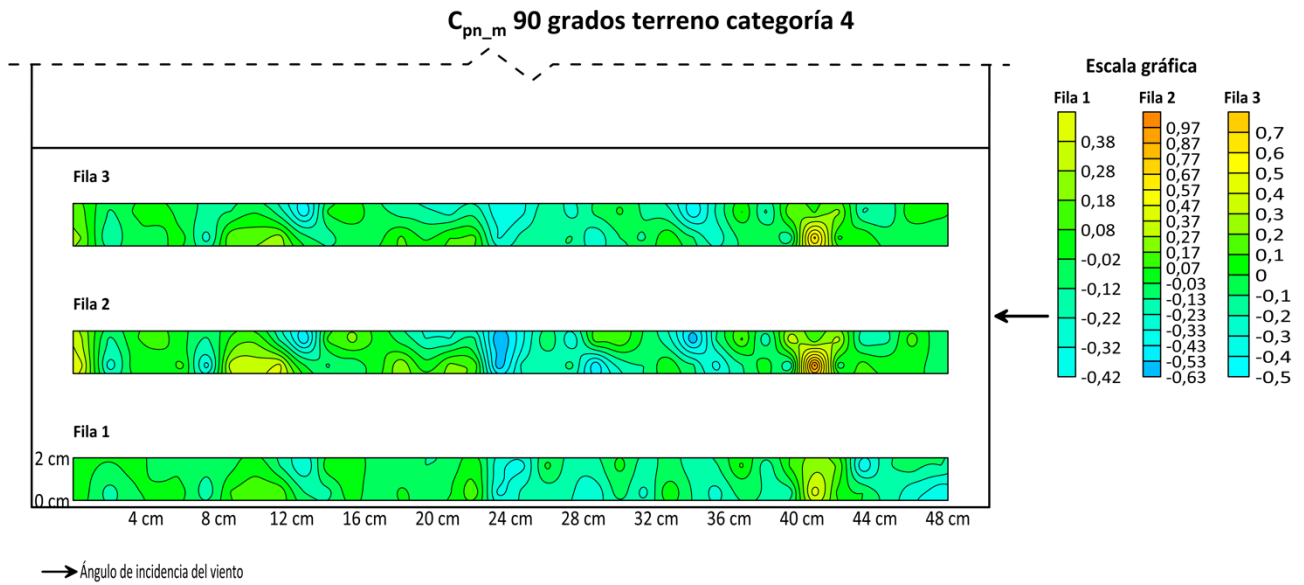


Ilustración 59. Coeficientes de presión neta medios, para un ángulo de incidencia del viento de 90° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

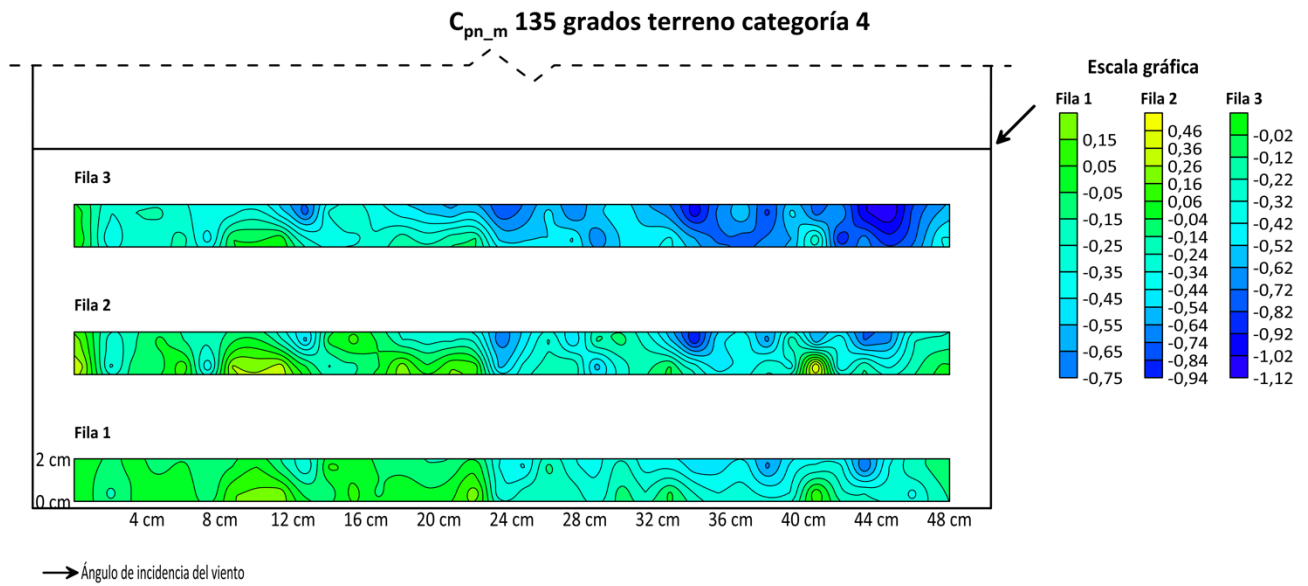


Ilustración 60. Coeficientes de presión neta medios, para un ángulo de incidencia del viento de 135° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

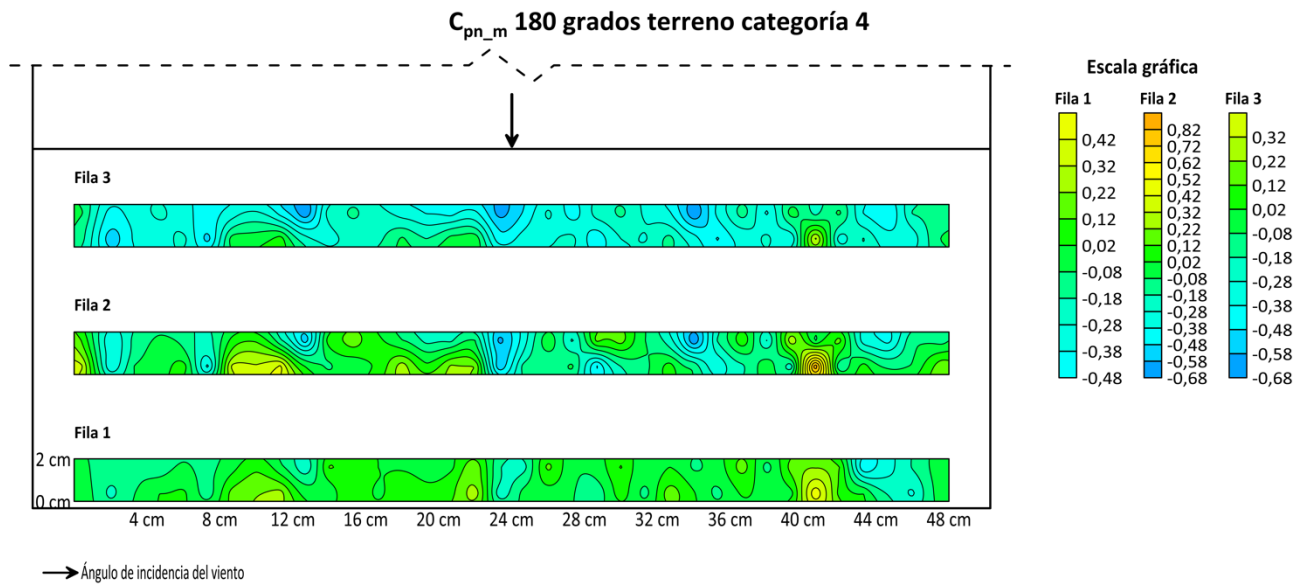


Ilustración 61. Coeficientes de presión neta medios, para un ángulo de incidencia del viento de 180° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

Nota: Mapas completos en apéndice D.

Coeficientes de presión neta, valores picos máximos ( $C_{pn\_pmax}$ )

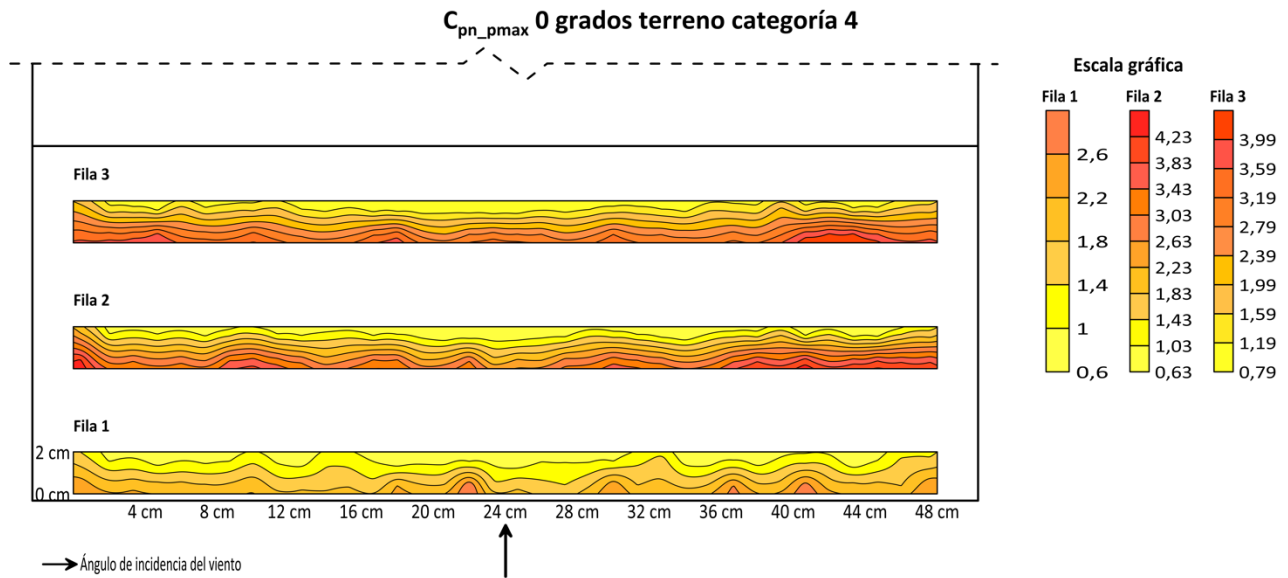


Ilustración 62. Coeficientes de presión neta picos máximos, para un ángulo de incidencia del viento de  $0^\circ$  y terreno categoría 4 [elaboración propia].

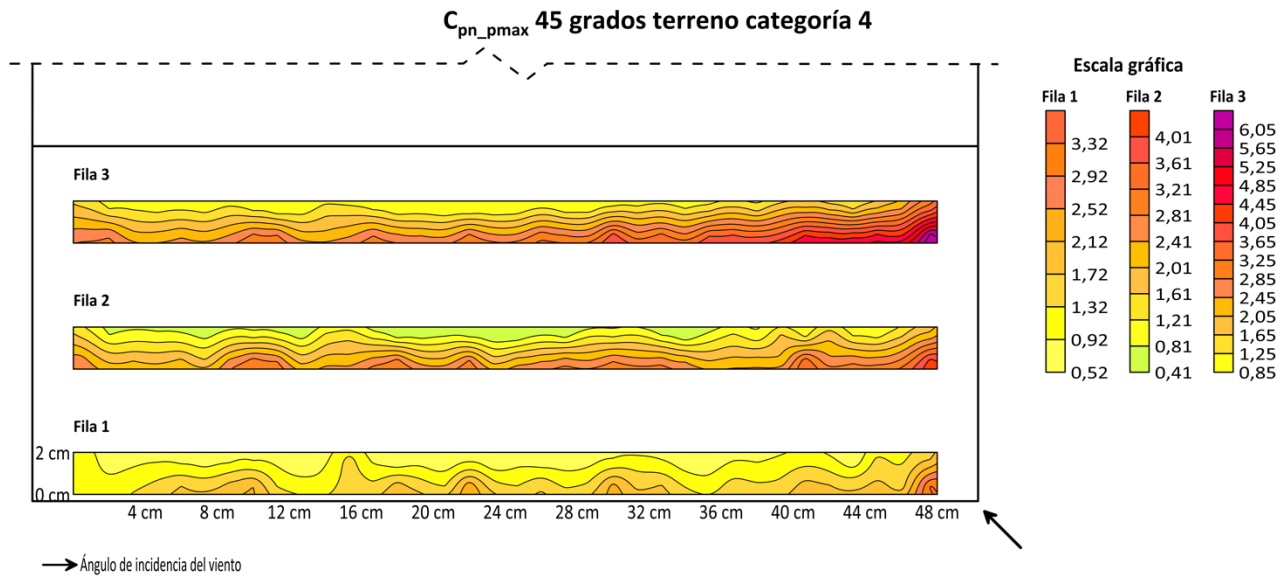


Ilustración 63. Coeficientes de presión neta picos máximos, para un ángulo de incidencia del viento de  $45^\circ$  y terreno categoría 4 [elaboración propia].

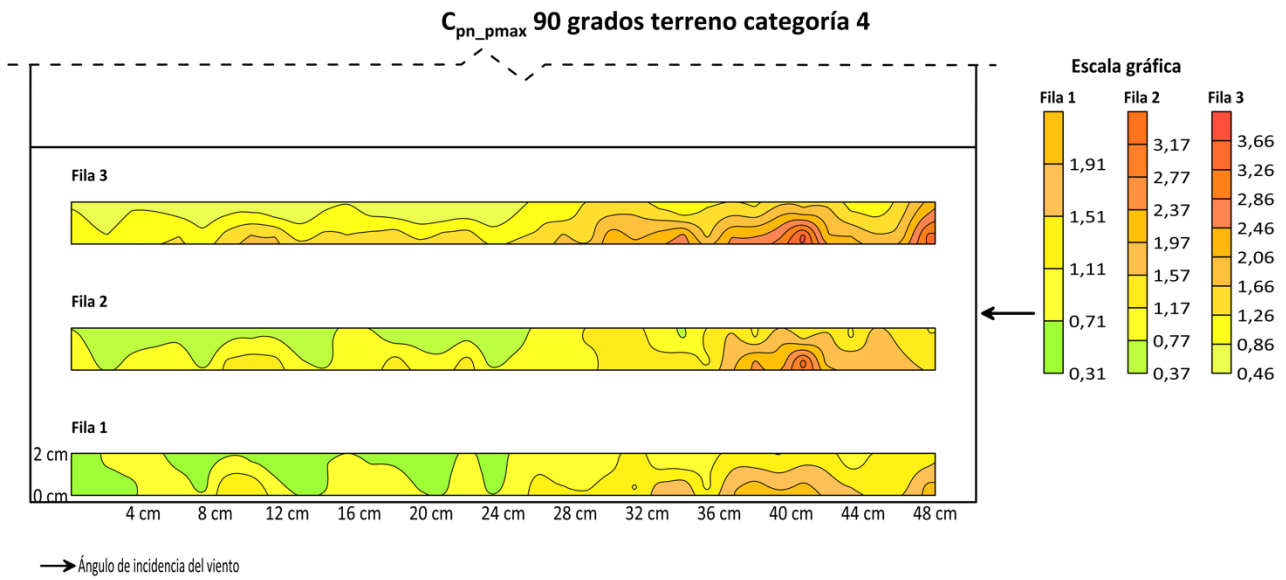


Ilustración 64. Coeficientes de presión neta picos máximos, para un ángulo de incidencia del viento de 90° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

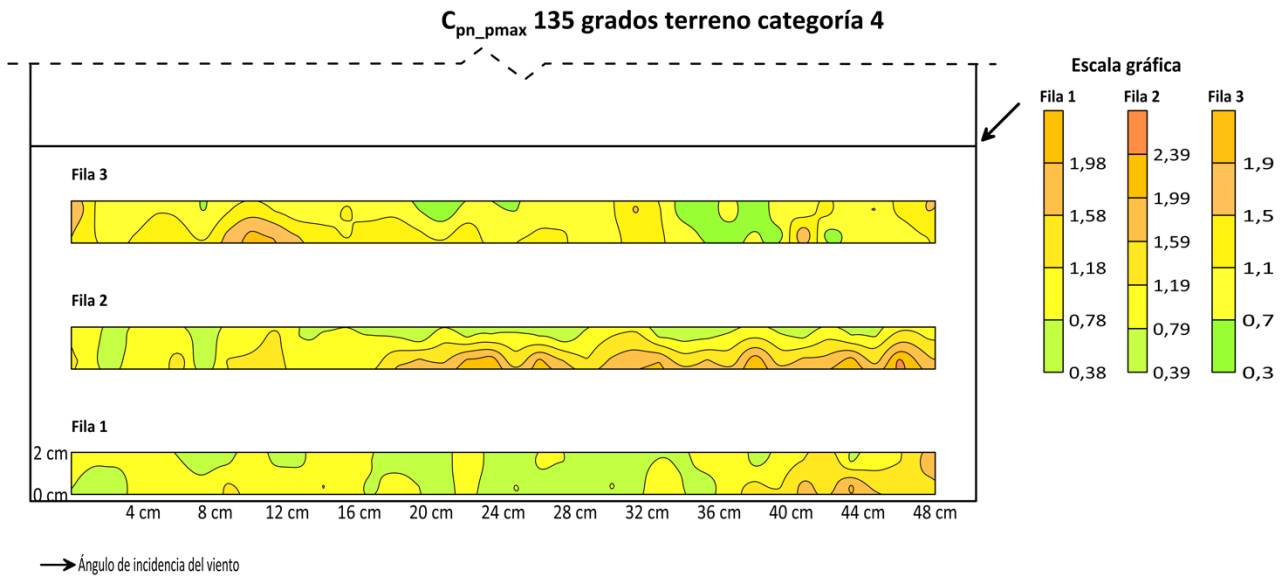


Ilustración 65. Coeficientes de presión neta picos máximos, para un ángulo de incidencia del viento de 135° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

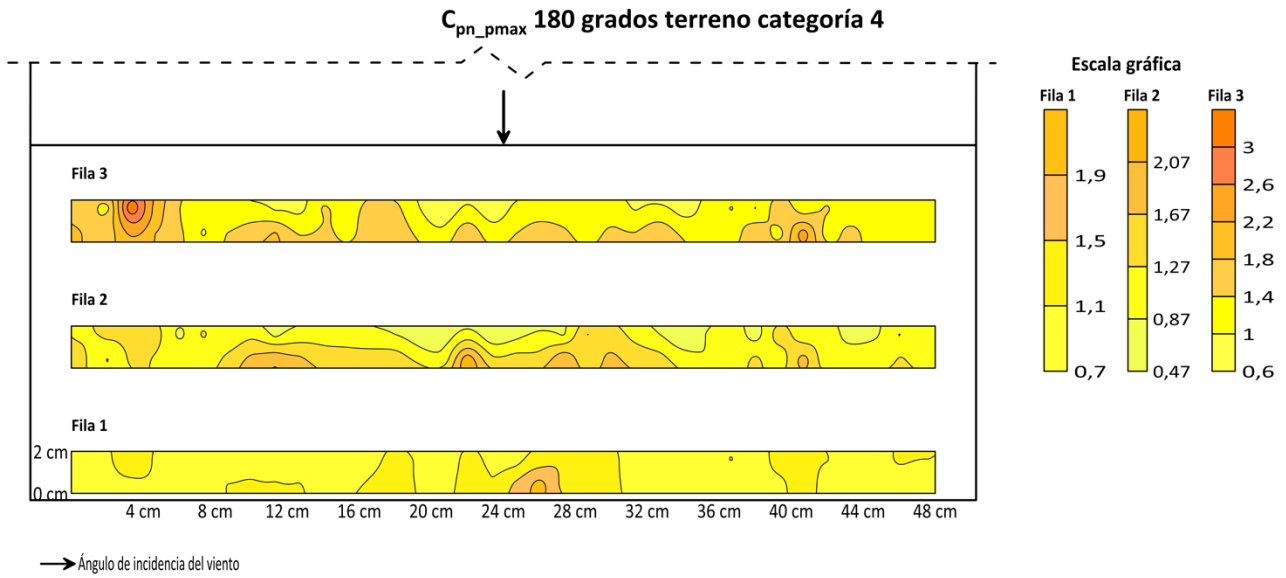


Ilustración 66. Coeficientes de presión neta picos máximos, para un ángulo de incidencia del viento de 180° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

Nota: Mapas completos en apéndice E.

### Coeficientes de presión neta, valores picos mínimos ( $C_{pn\_pmin}$ )

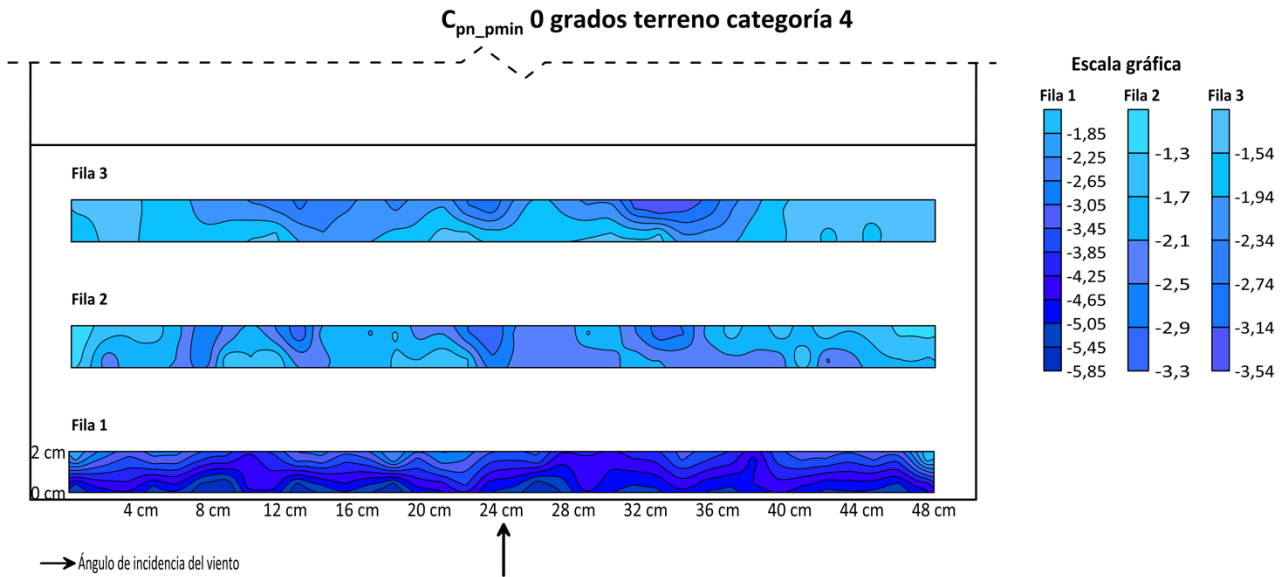


Ilustración 67. Coeficientes de presión neta picos mínimos, para un ángulo de incidencia del viento de 0° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

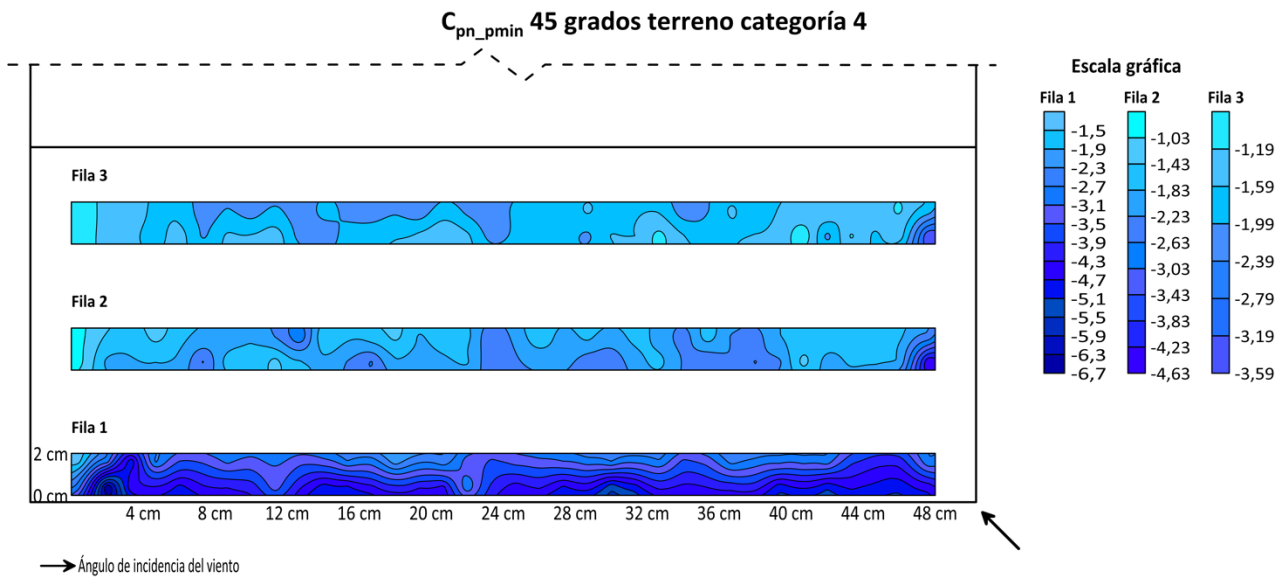


Ilustración 68. Coeficientes de presión neta picos mínimos, para un ángulo de incidencia del viento de 45° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

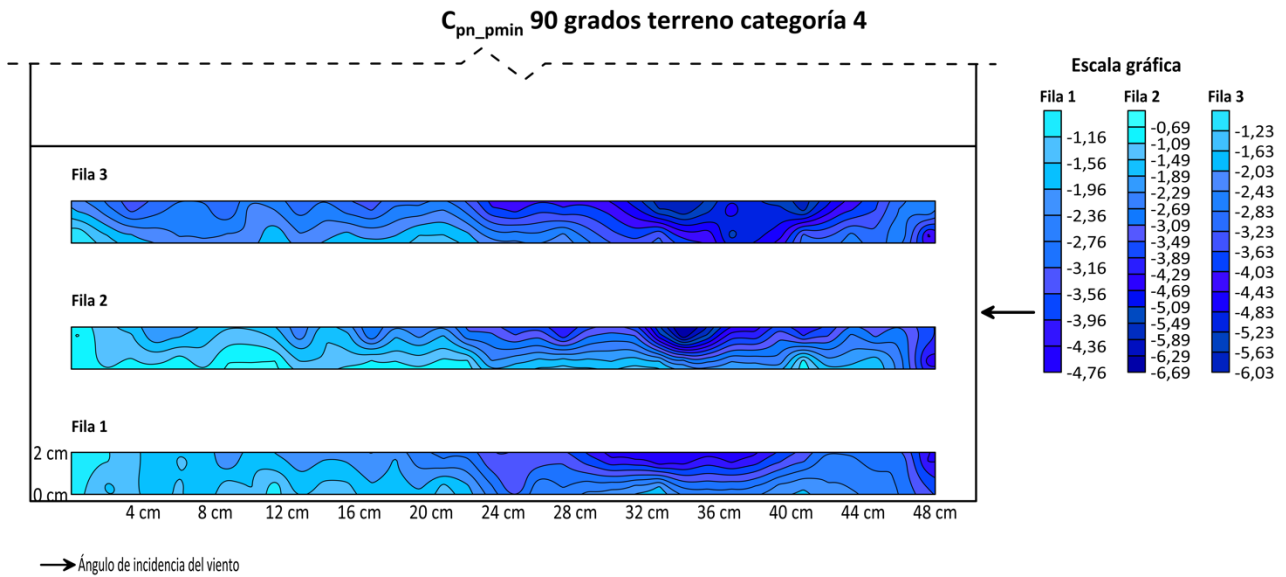


Ilustración 69. Coeficientes de presión neta picos mínimos, para un ángulo de incidencia del viento de 90° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

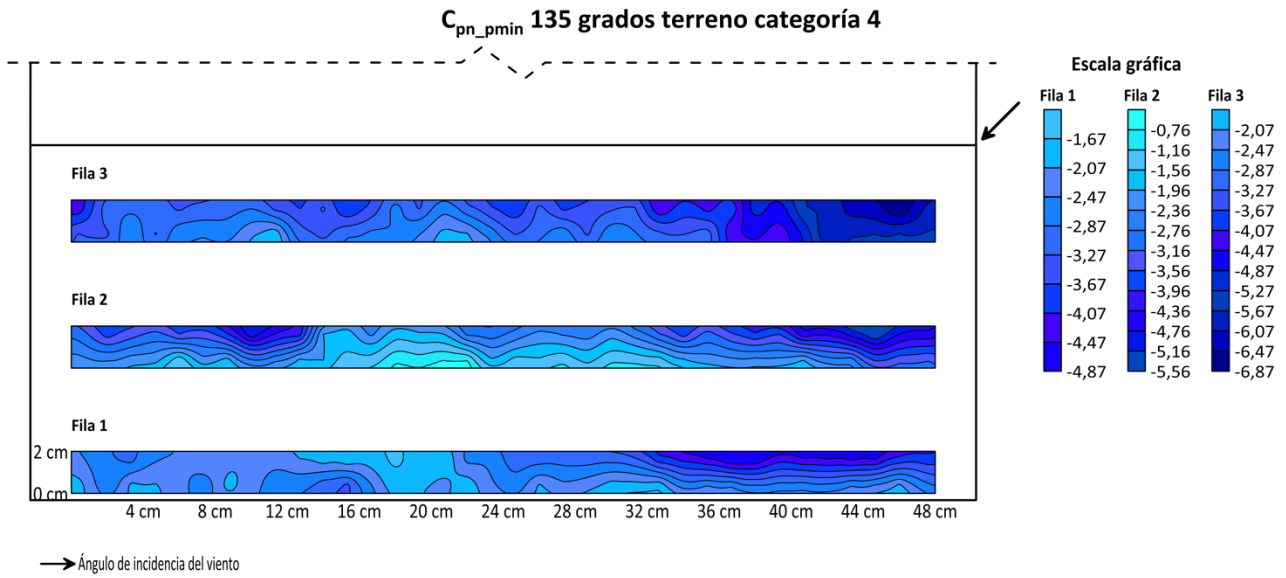


Ilustración 70. Coeficientes de presión neta picos mínimos, para un ángulo de incidencia del viento de 135° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

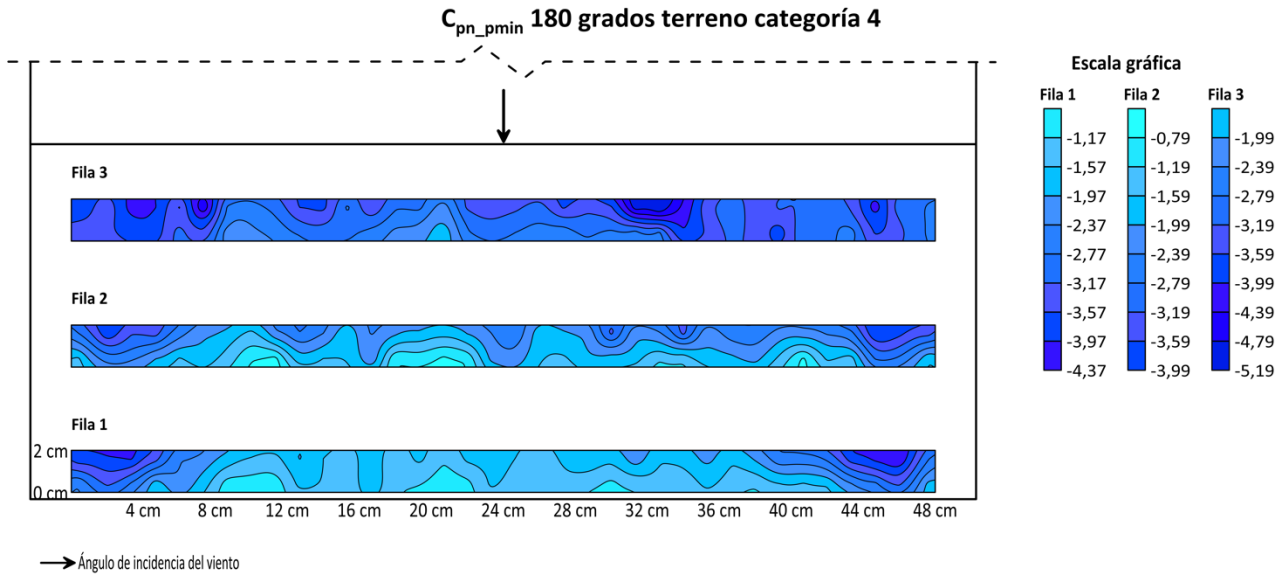


Ilustración 71. Coeficientes de presión neta picos mínimos, para un ángulo de incidencia del viento de 180° y terreno categoría 4 [elaboración propia].

Nota: Mapas completos en apéndice F.



#### 4.2.3 Resumen de los coeficientes de presión neta obtenidos

Los mapas mostrados anteriormente son una ayuda visual, la cual muestra el efecto del viento sobre los paneles fotovoltaicos; sin embargo, se puede apreciar que los máximos y mínimos de los coeficientes de presión neta medios, picos máximos y picos mínimos, que se presentan en las filas 1, 2 y 3, no coinciden en cuanto al ángulo de incidencia del viento, por lo cual a continuación se resumen dichos valores y el ángulo de incidencia del viento en el que se presentan.

		Terreno categoría 1		Terreno categoría 4	
		Ángulo	C <sub>pn_m</sub>	Ángulo	C <sub>pn_m</sub>
Máximos	Fila 1	40	0.86	180	0.50
	Fila 2	30	1.51	60	1.23
	Fila 3	30	1.86	30	1.29
Mínimos	Fila 1	45	-1.19	20	-0.91
	Fila 2	70	-1.05	120	-1.05
	Fila 3	130	-1.39	135	-1.12

Tabla 1. Resumen de máximos y mínimos de los coeficientes de presión neta medios por fila de paneles fotovoltaicos [elaboración propia].

		Terreno categoría 1		Terreno categoría 4	
		Ángulo	C <sub>pn_pmax</sub>	Ángulo	C <sub>pn_pmax</sub>
Máximos	Fila 1	30	2.27	45	3.38
	Fila 2	30	2.37	70	5.06
	Fila 3	40	3.10	40	6.42
Mínimos	Fila 1	50	-0.17	100	0.28
	Fila 2	150	-0.09	110	0.08
	Fila 3	140	-0.50	135	0.30

Tabla 2. Resumen de máximos y mínimos de los coeficientes de presión neta picos máximos por fila de paneles fotovoltaicos [elaboración propia].

		Terreno categoría 1		Terreno categoría 4	
		Ángulo	C <sub>pn_pmin</sub>	Ángulo	C <sub>pn_pmin</sub>
Máximos	Fila 1	45	0.18	160	-0.97
	Fila 2	40	0.47	100	-0.40
	Fila 3	40	0.58	60	-0.61
Mínimos	Fila 1	0	-3.92	30	-6.70
	Fila 2	100	-3.27	110	-7.22
	Fila 3	110	-3.77	130	-7.93

Tabla 3. Resumen de máximos y mínimos de los coeficientes de presión neta picos mínimos por fila de paneles fotovoltaicos [elaboración propia].

#### 4.3 Análisis de resultados

En la ilustración 42, que presentan los coeficientes de presión neta medios para un ángulo de incidencia del viento de  $0^{\circ}$  y terreno categoría 1, se puede observar que un gran porcentaje del área de la fila 1 de paneles fotovoltaicos presenta coeficientes de presión neta medios menores a los presentes en la fila 2 y estos a su vez son menores a los presentes en la fila 3, de igual manera se puede observar simetría en la distribución de los coeficientes de cada una de las filas. Esto es consistente con lo que se observa en las ilustraciones 47 y 52, que corresponden a los coeficientes de presión neta picos máximos y picos mínimos, respectivamente, para el mismo ángulo de incidencia del viento y categoría de terreno. Esto mismo sucede con las ilustraciones 57, 62, y 67 para un terreno categoría 4.

De la ilustración 43, que presenta los coeficientes de presión neta medios para un ángulo de incidencia del viento de  $45^{\circ}$  y terreno categoría 1, se puede apreciar que la fila 1 de paneles fotovoltaicos presenta en un gran porcentaje de su área coeficientes de presión neta medios menores a los que se presentan en la fila 2 y estos a su vez son menores a los que se presentan en la fila 3. Esto es consistente con lo que se puede observar en las ilustraciones 48 y 53, que corresponden a los coeficientes de presión neta picos máximos y picos mínimos, respectivamente, para el mismo ángulo de incidencia del viento y categoría de terreno. Esto mismo sucede con las ilustraciones 58, 63, y 68 para un terreno categoría 4.

*Al observar la ilustración 44, que presenta los coeficientes de presión neta medios para un ángulo de incidencia del viento de  $90^{\circ}$  y terreno categoría 1, se puede apreciar cierta simetría en la distribución de los coeficientes de las tres filas a lo largo de estas, de igual manera se presentan coeficientes ligeramente menores en un mayor porcentaje de área de la fila 1. Esto también se aprecia en las ilustraciones 49 y 54, que corresponden a los coeficientes de presión neta picos máximos y picos mínimos, respectivamente, para el mismo ángulo de incidencia del viento y categoría de terreno.*

*Esto mismo sucede con las ilustraciones 59 y 64 para un terreno categoría 4, caso contrario al observar la ilustración 69 ya que en este caso existen un mayor porcentaje de área con coeficientes menores en la fila 3.*

*Al analizar la ilustración 45, que presenta los coeficientes de presión neta medios para un ángulo de incidencia del viento de  $135^{\circ}$  y terreno categoría 1, se puede apreciar que la fila 3 presenta en un mayor porcentaje de área coeficientes menores a los que se presentan en la fila 2 y estos a su vez menores a los presentes en la fila 1. Esto también se aprecia en las ilustraciones 50 y 55, que corresponden a los coeficientes de presión neta picos máximos y picos mínimos respectivamente, para el mismo ángulo de incidencia del viento y categoría de terreno.*

*Esto mismo sucede con las ilustraciones 60 y 70 para un terreno categoría 4, siendo la única variante lo observado en la ilustración 65 ya que existe un mayor porcentaje de área con coeficientes menores en la fila 3, posteriormente en la fila 1 y al final en la fila 2.*

*Al observar la ilustración 46, que presenta los coeficientes de presión neta medios para un ángulo de incidencia del viento de  $180^{\circ}$  y terreno categoría 1, se aprecia que en un gran porcentaje del área de la fila 3 se presentan coeficientes menores a los de la fila 2 y estos a su vez menores a los de la fila 1, de igual manera se observa simetría en la distribución de los coeficientes de cada una de las filas.*

*Esto se repite en la ilustración 56 que presenta los coeficientes de presión neta picos mínimos, para el mismo ángulo de incidencia del viento y categoría de terreno, y también para las ilustraciones 61 y 71 para un ángulo de incidencia del viento de  $180^{\circ}$  y terreno categoría 4. Caso contrario al observar las ilustraciones 51 y 66 que presentan los coeficientes de presión neta picos máximos, para un ángulo de incidencia del viento de  $180^{\circ}$  y terrenos categoría 1 y 4, respectivamente, ya que en estas se observan en un mayor porcentaje de área de la fila 3 coeficientes mayores a los presentes en las demás filas.*

*Por último, al analizar los mapas de las simulaciones de terreno categoría 1 y 4, se puede observar que existe una mayor variación en los coeficientes de presión neta medios, picos*

*máximos y picos mínimos correspondiente a la simulación de terreno categoría 4, esto se atribuye a la intensidad de turbulencia presente en dicha simulación de terreno, ya que ésta es mayor en un terreno categoría 4 que categoría 1.*

## **Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones**

### **5.1 Conclusiones**

*Se realizaron estudios experimentales en el túnel de viento de capa límite atmosférica para estudiar la distribución de presiones sobre paneles fotovoltaicos montados en la cubierta de una edificación baja de dos aguas. Este tipo de configuración no está contemplada en la normatividad actual. Con base en las presiones registradas en las pruebas, se calcularon coeficientes de presión neta, útiles para el diseño del soporte de los paneles. Más específicamente se concluye lo siguiente:*

*Los mapas obtenidos permiten conocer el efecto del viento sobre paneles fotovoltaicos montados en cubiertas de dos aguas. Este comportamiento es variable y dependerá de la posición en la que se encuentren sobre la cubierta, del ángulo de inclinación del panel fotovoltaicos, al igual que dependerá del ángulo de incidencia del viento, de su velocidad y la categoría de terreno presente en el sitio.*

*Las filas de paneles fotovoltaicos inicial y final, al igual que los extremos de todas las filas, son los más afectados por los efectos del viento.*

*Se observan diferencias importantes en los coeficientes de presión neta medios, máximos y mínimos para cada tipo de categoría del terreno. Esto se debe al efecto que provoca la turbulencia del viento en su comportamiento.*

### **5.2 Recomendaciones**

*Es indispensable para cualquier obra civil garantizar un óptimo funcionamiento, por lo cual los coeficientes de presión neta resumidos en las tablas 1, 2 y 3 proveen una alternativa que puede ser empleada en el diseño de proyectos semejantes al de estudio; sin embargo, no es recomendable que se utilicen en el diseño de proyectos que no cumplan con las características de este estudio, en estos casos se recomienda realizar un estudio experimental en túnel de viento.*

*Se recomienda realizar más pruebas experimentales en túnel de viento que contemplen edificios bajos de diferentes geometrías con paneles fotovoltaicos sobre las cubiertas.*

*Se sugiere emplear métodos estadísticos para el procesamiento de los coeficientes de presión neta, obtenidos de las pruebas en túnel de viento.*

## **Referencias y bibliografía**

- [1] Amaya, E., Pozos, A., & Gómez, R. (2019). *Base de datos aerodinámica para diseño estructural. Serie Investigación y Desarrollo, 704. Series del Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.*
- [2] AMDEE. (2008). "Protocolo de Kyoto", Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE). De AMDEE Sitio web: <http://www.nacionmulticultural.unam.mx/mezinal/docs/236.pdf>
- [3] AROS. *La radiación solar.* De AROS, Solar Technology Sitio web: <http://www.aros-solar.com/es/la-radiacion-solar>
- [4] Axaopoulos, P. (2017). *Principios de la geometría solar.* Atenas, Grecia: TEI & LaBRI.
- [5] BP. (2019). *BP Statistical Review of World Energy.* (68<sup>th</sup> ed.). London, UK: BP p.l.c.
- [6] Burgos, I. (2014). *40 Cosas de la Energía Solar que Debes Saber.* De [energiasrenovablesinfo.com](http://www.energiasrenovablesinfo.com) Sitio web: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/>
- [7] Burgos, I. (2014). *Tipos de Paneles Fotovoltaicos.* De [energiasrenovablesinfo.com](http://www.energiasrenovablesinfo.com) Sitio web: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>
- [8] Calatayud, M. (2015). *Diseño de una instalación solar fotovoltaica en la nave industrial Hermanos Calatayud situada en la Font de la Figuera (Valencia).* Valencia, España: Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica de Valencia.
- [9] Conermex. (2019). *Catálogo de productos.* México: Conectando a México con el Sol.
- [10] Cooper P. I. (1969). *The absorption of radiation in solar stills.* *Solar Energy*, vol. 12, pp. 333 - 346,
- [11] Cronemberger, J. (2015). *Integración de Sistemas Fotovoltaicos en Edificios de Oficinas de Bajas Latitudes: Estudios del Balance Energético Aplicado a Brasil.* Madrid, España: Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- [12] CUAED. (2017). *Coordenadas Geográficas.* De Coordinación de Universidad Abierta y Educación a Distancia. Universidad Nacional Autónoma de México Sitio web: [http://uapas1.bunam.unam.mx/matematicas/coordenadas\\_geograficas/](http://uapas1.bunam.unam.mx/matematicas/coordenadas_geograficas/)
- [13] D. G. de Industria, Energía y Minas Comunidad de Madrid & Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2009). *Guía de Integración Solar Fotovoltaica.* Madrid, España: La Suma de Todos.

- [14] Diaz, T., & Carmona, G. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. España: McGraw Hill.
- [15] EJOT. (2019). *Sistemas de Fijación para Instalaciones Solares*. San Luis Potosí, México: EJOTATF Fasteners de México y Compañía, S. en C.
- [16] *Energy Efficiency and Renewable Energy. The History of Solar Energy*. U.S: U.S. Department of Energy.
- [17] Escobar, J. *La traslación de la Tierra*. De astrojem.com Sitio web: <https://astrojem.com/teorias/tierratraslacion.html>
- [18] Gimén, E. J. L., Cabrera, J., García, R., Rius, J., & Gonzalvo, J. (2014). *Soluciones Arquitectónicas Energía Solar Fotovoltaica*. Comunidad Valenciana, España: Universitat Jaume I.
- [19] González, R., Jiménez, H., & Lagunas, J. (2003, octubre-diciembre). *Sistemas fotovoltaicos conectados a la red*. Boletín IIE, pp. 140-144.
- [22] Huidrobo, M. (2016). *Diseño de una estructura soporte para un módulo integrado de placa fotovoltaica*. Madrid, España: Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Madrid.
- [23] IILSEN. (2004). *Nuevas Energías Renovables: Una Alternativa Energética Sustentable para México*. México: Senado de la República.
- [24] Labandeira, X., Linares, P., & Würzburg K. (2012). *Energías Renovables y Cambio Climático*. España: economics for energy.
- [25] López, A. (2017). *Determinación de coeficientes de presión para paneles fotovoltaicos dentro de un parque bajo la acción del viento*. La Habana, Cuba: Tesis Doctoral, Universidad Tecnológica de La Habana.
- [26] Mendoza, C. A. (2011). *Viabilidad técnica-económica de una central solar termoeléctrica de colectores cilíndricos parabólicos para su implementación en México*. México: Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [27] Ministerio de Educación. *Movimientos de la Tierra*. Chile: Ministerio de Educación de Chile.
- [28] Nava, R. (2019). *Comparación de los efectos del viento en un edificio esbelto: metodología analítica vs metodología experimental en túnel de viento*. México: Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [29] Pulido, A. (2008). *Materiales Semiconductores*. Canarias: aprendemostecnologia.org.

[30] Romero, J. (2015). *Análisis del Funcionamiento de Paneles Fotovoltaicos y su Utilización en las Regiones de la Costa y Sierra del Ecuador. Caso de Estudio: Biblioteca Pompeu Fabra de Matáo. Barcelona, Catalunya: Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Catalunya.*

[31] SEMARNAT. (2009). *Cambio climático. Ciencia evidencia y acciones. Mexico: SNIARN.*

[32] SENER. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026. México: Gobierno Federal SENER.*

[33] solar-energia.net. (2018). *Historia de la Energía Solar. De solar-energia.net Sitio web: <https://solar-energia.net/que-es-energia-solar/historia>*

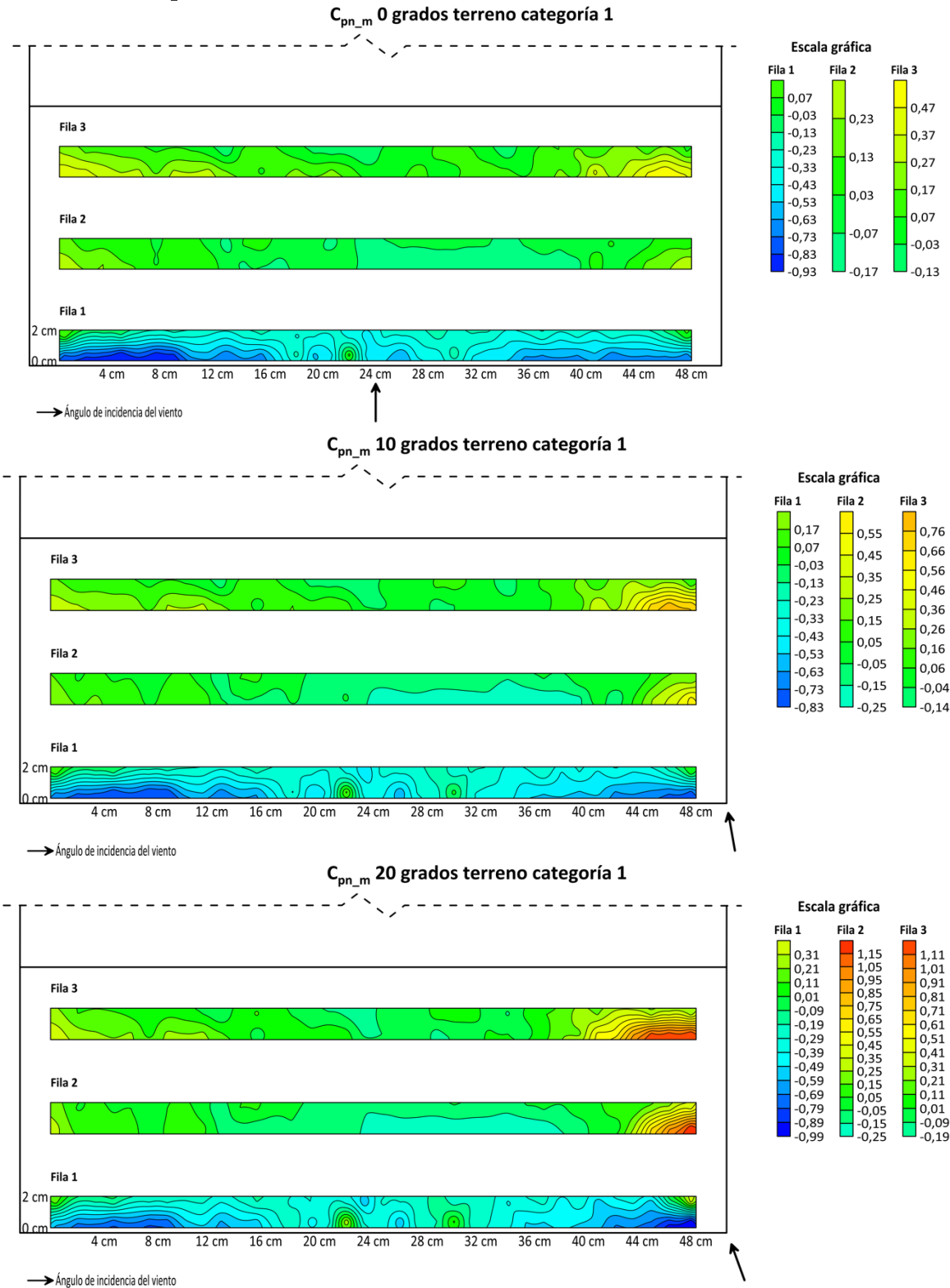
[34] Trápaga R. (2004, enero-marzo). *Energéticos fósiles. Revista Ciencia , vol. 55 num. 1, pp. 41-54.*

[35] Vega, R. (2013). *Estudio Comparativo de Distintas Tecnologías Fotovoltaicas. Madrid, España: Tesis de Licenciatura. Universidad Carlos III de Madrid.*

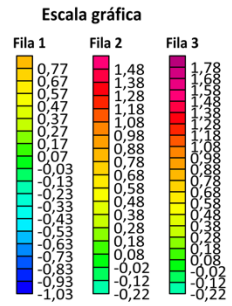
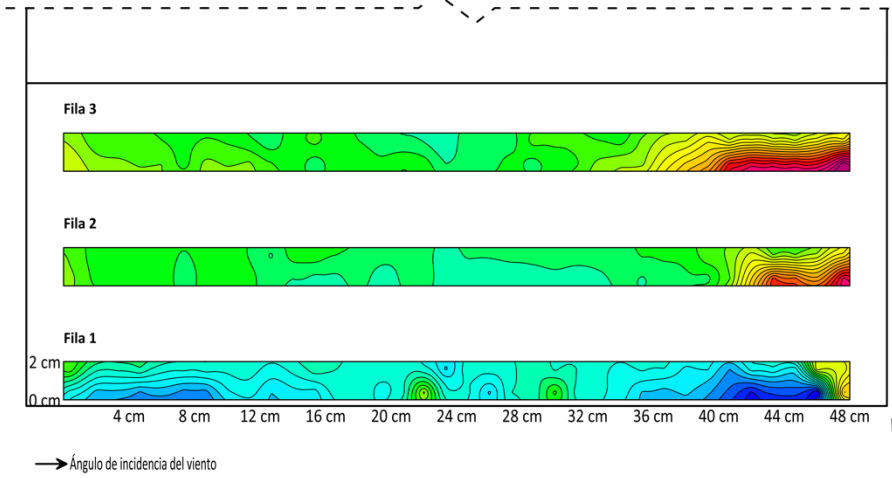
[36] Ximénez, L. *Breve Historia de la Electricidad. De ateneoescurialense.org Sitio web: [http://www.ateneoescurialense.org/Archivos/Adjuntos/Contenidos/Historia\\_de\\_la\\_\\_ELECTRICIDAD.pdf](http://www.ateneoescurialense.org/Archivos/Adjuntos/Contenidos/Historia_de_la__ELECTRICIDAD.pdf)*



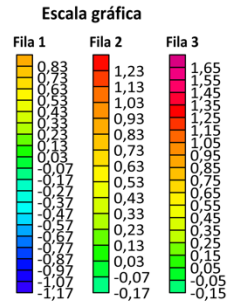
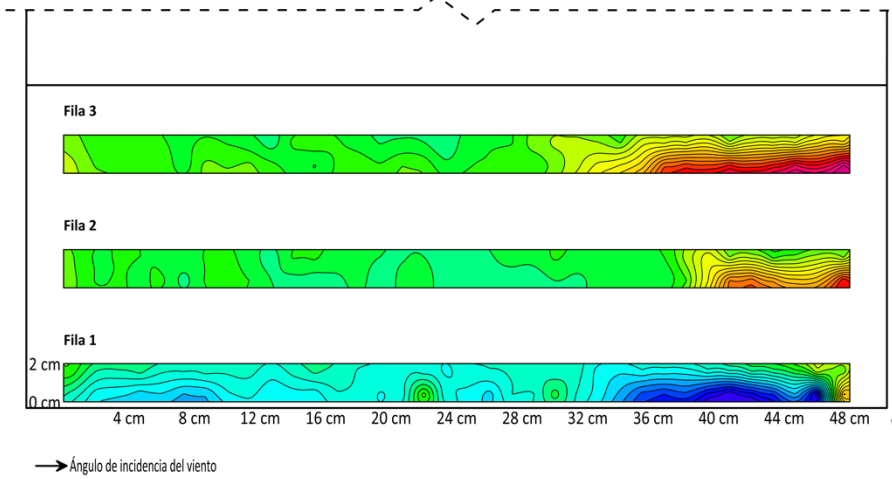
**Apéndice A. Mapas de coeficientes de presión neta, valores medios ( $C_{pn\_m}$ ), terreno categoría 1 [elaboración propia]**



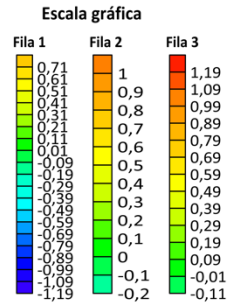
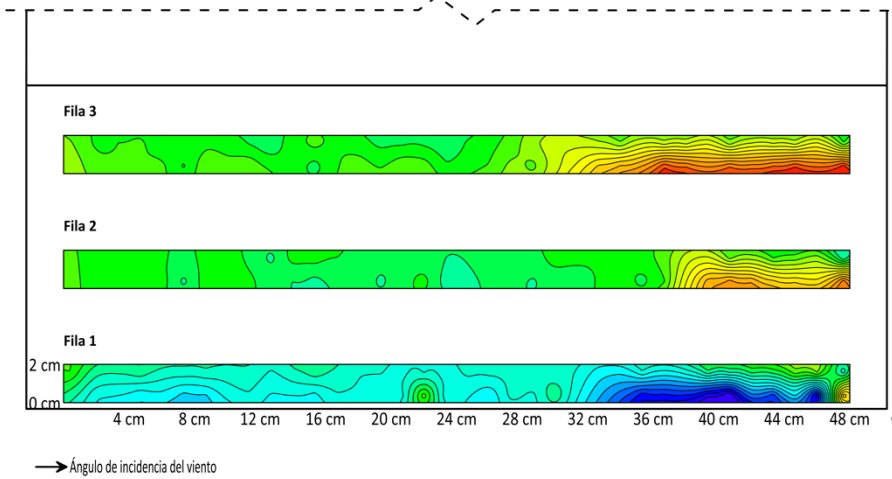
$C_{pn\_m}$  30 grados terreno categoría 1



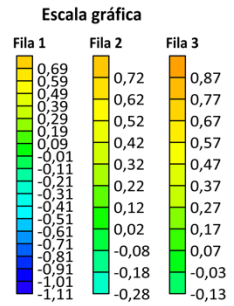
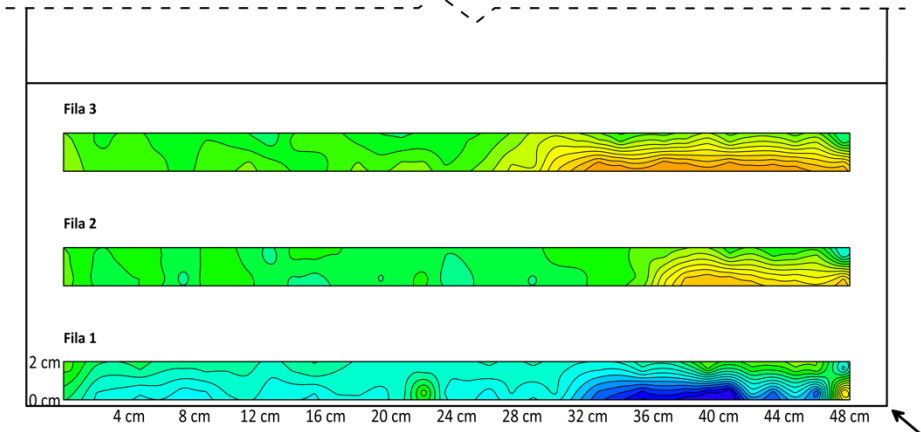
$C_{pn\_m}$  40 grados terreno categoría 1



$C_{pn\_m}$  45 grados terreno categoría 1

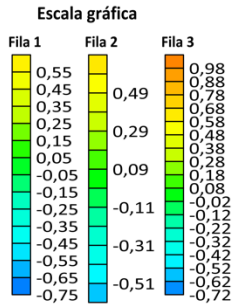
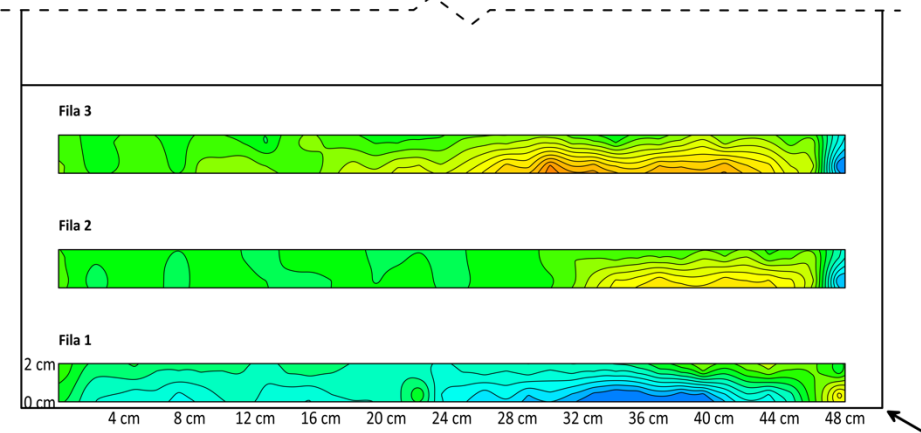


$C_{pn\_m}$  50 grados terreno categoría 1



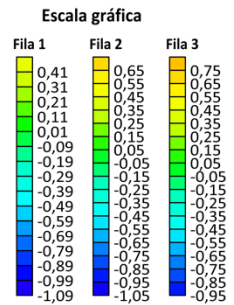
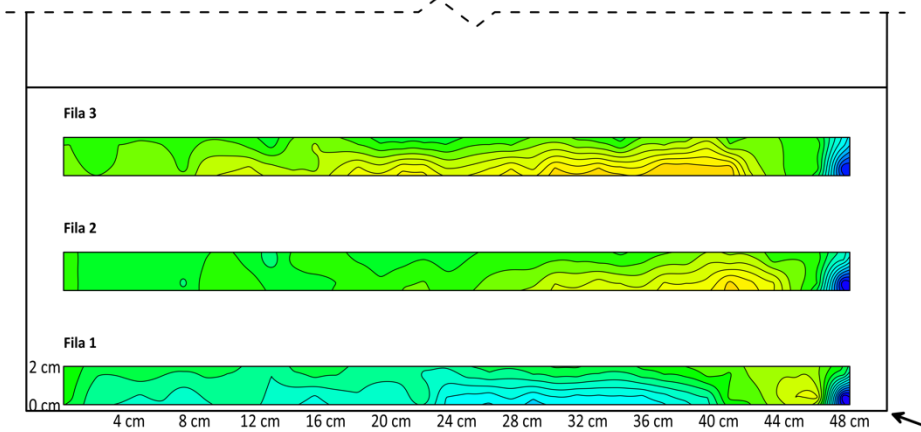
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_m}$  60 grados terreno categoría 1



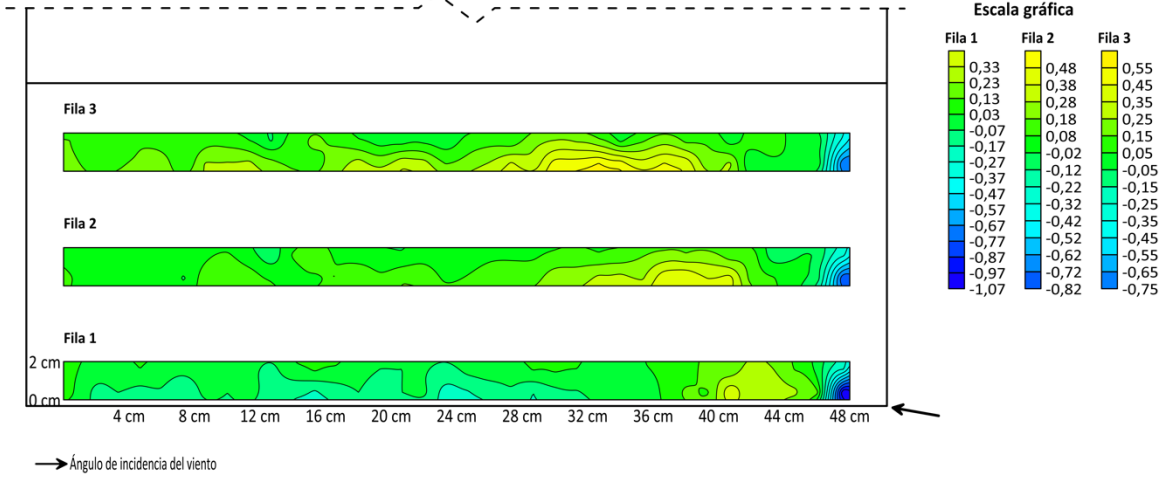
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_m}$  70 grados terreno categoría 1

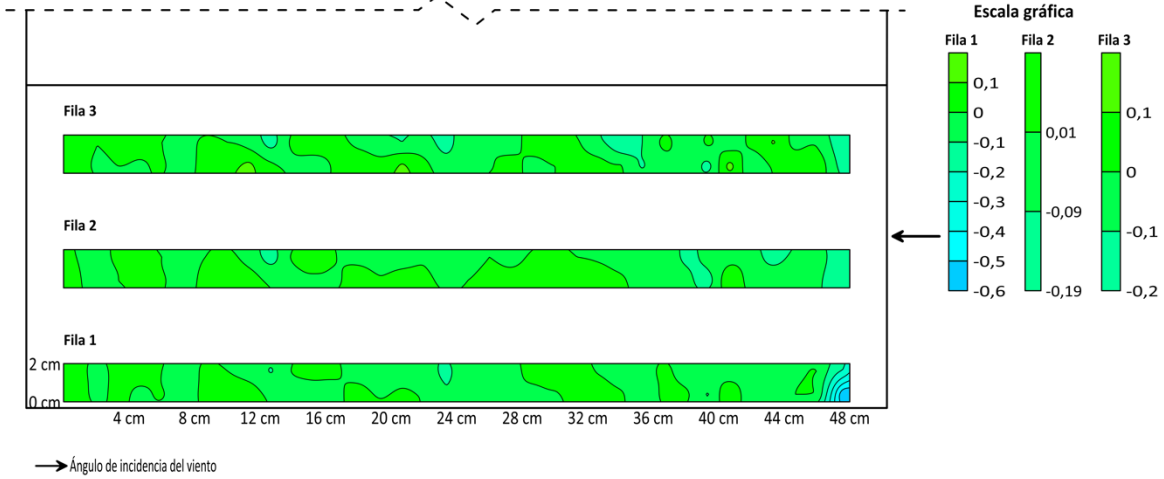


→ Ángulo de incidencia del viento

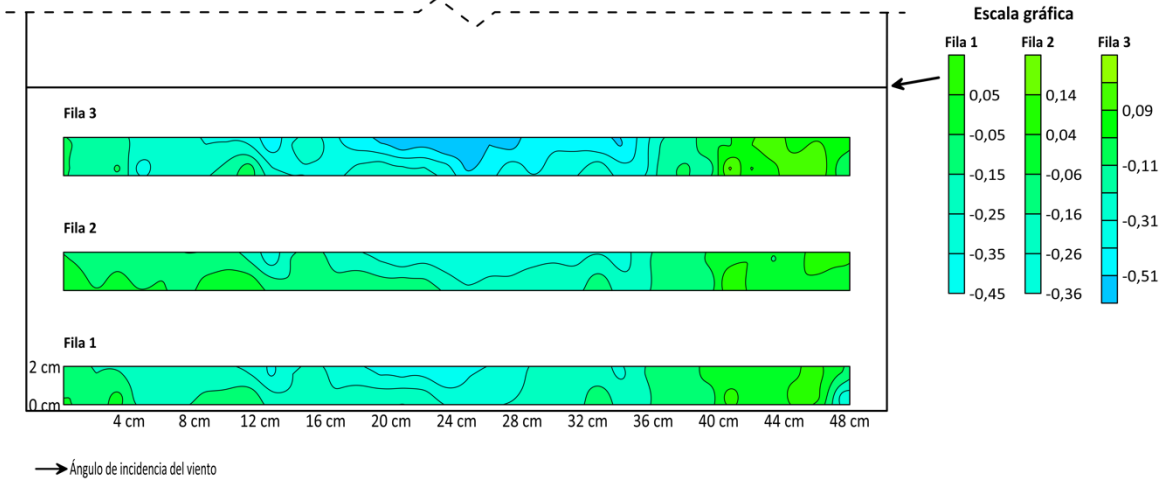
$C_{pn\_m}$  80 grados terreno categoría 1



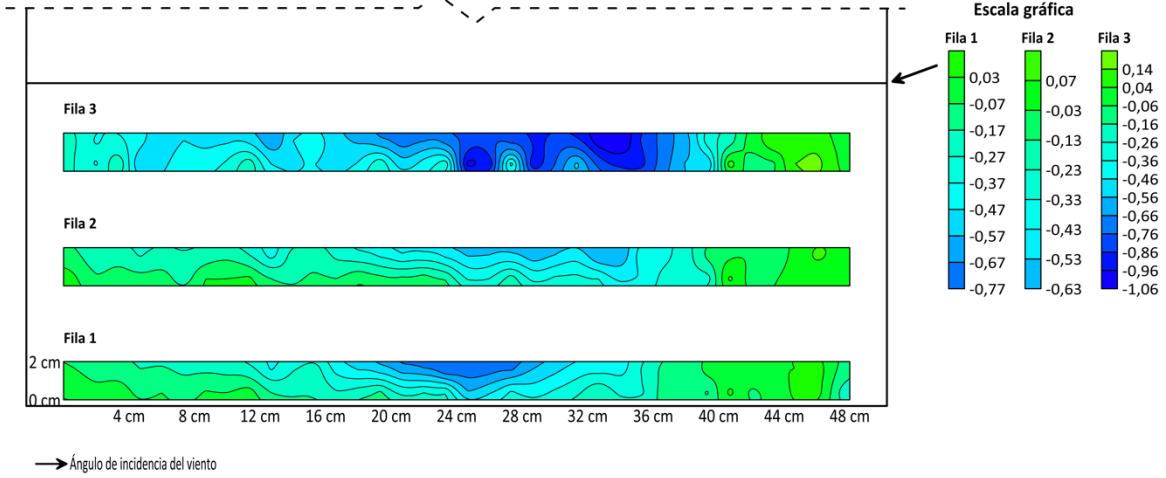
$C_{pn\_m}$  90 grados terreno categoría 1



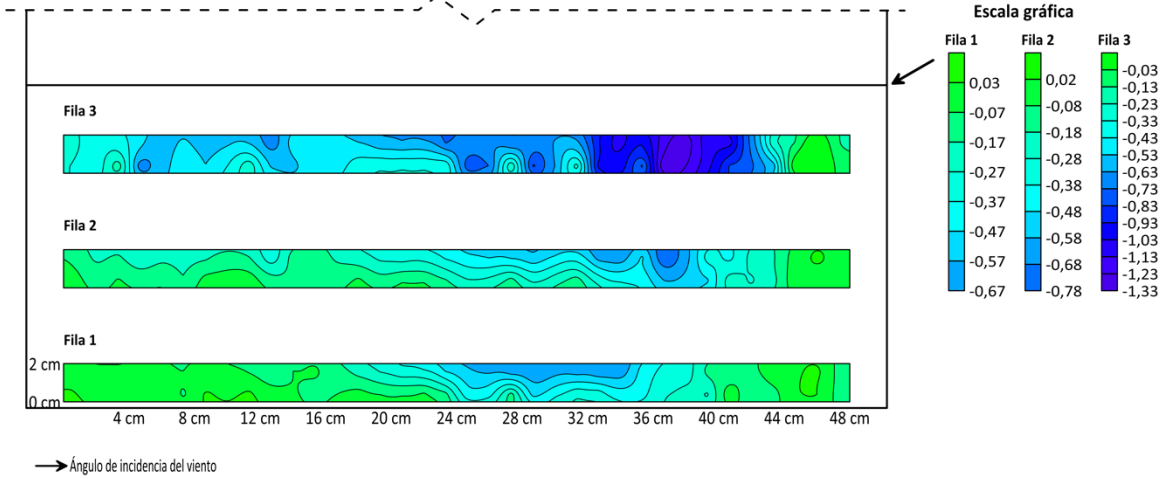
$C_{pn\_m}$  100 grados terreno categoría 1



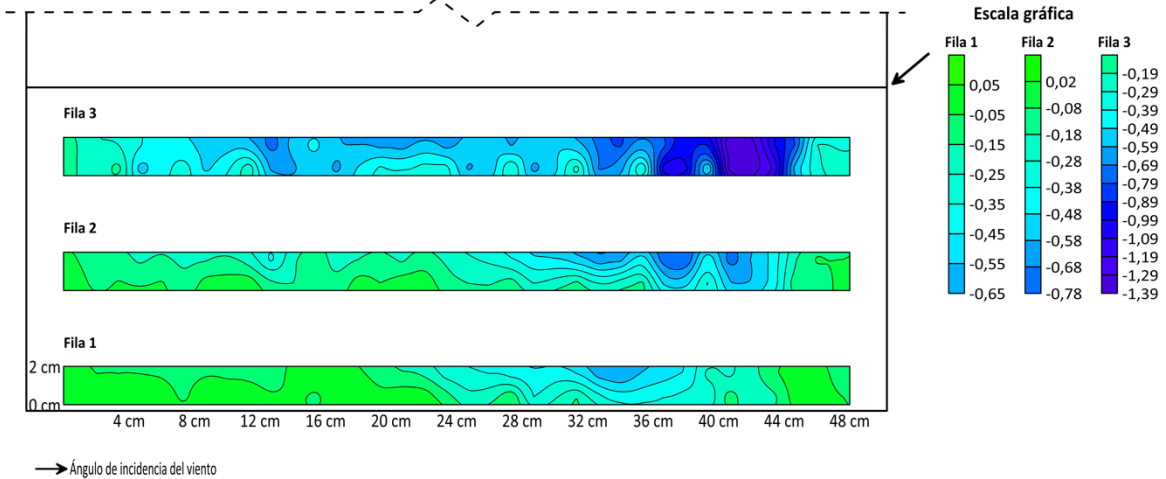
$C_{pn\_m}$  110 grados terreno categoría 1



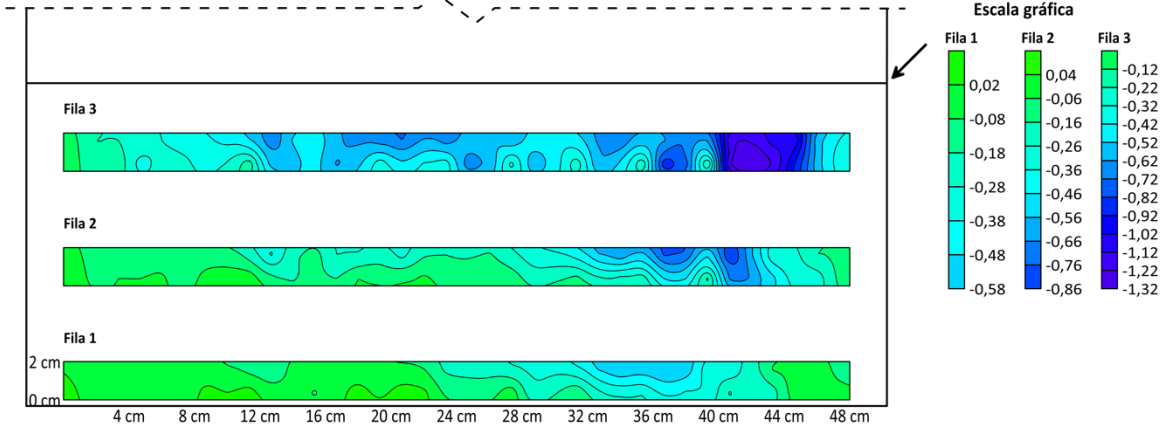
$C_{pn\_m}$  120 grados terreno categoría 1



$C_{pn\_m}$  130 grados terreno categoría 1

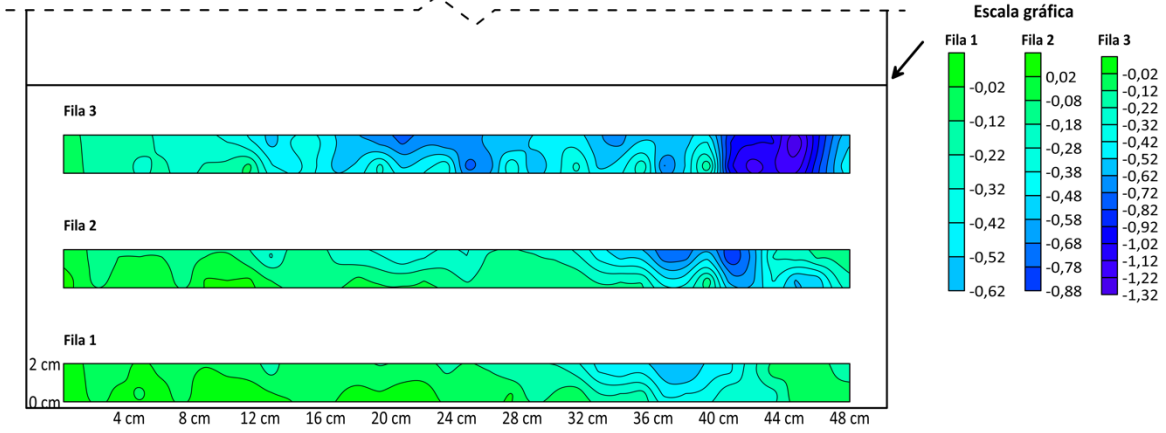


$C_{pn\_m}$  135 grados terreno categoría 1



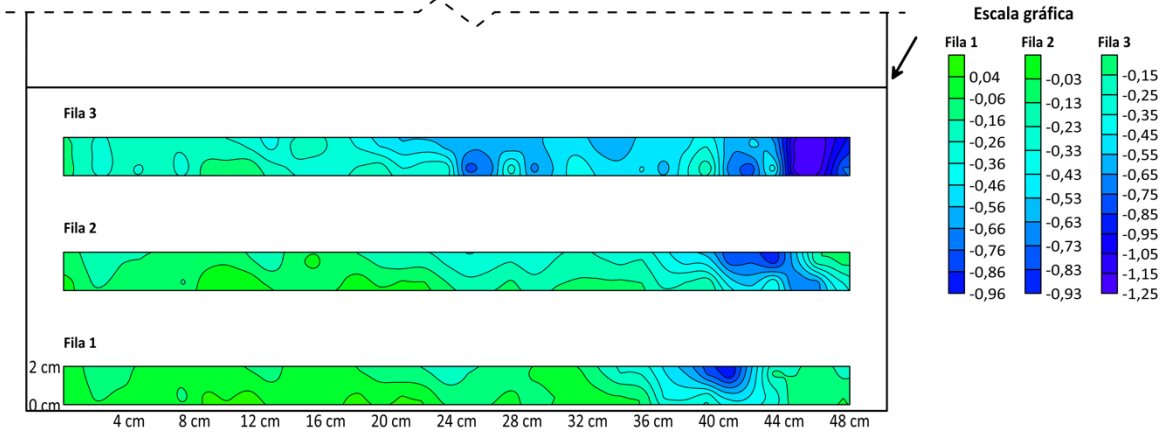
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_m}$  140 grados terreno categoría 1



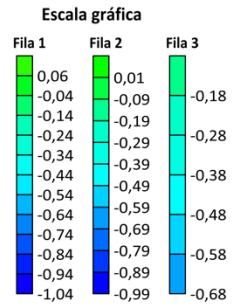
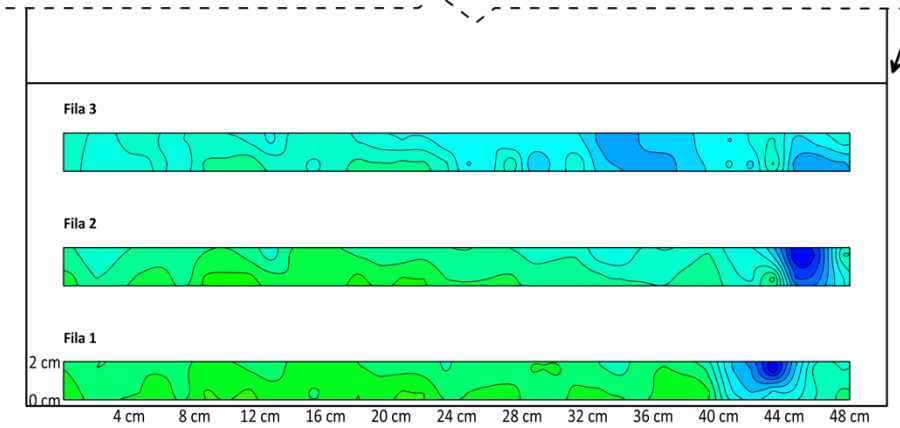
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_m}$  150 grados terreno categoría 1



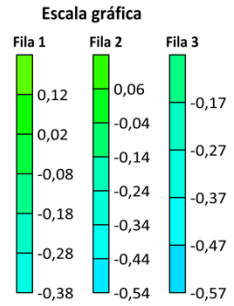
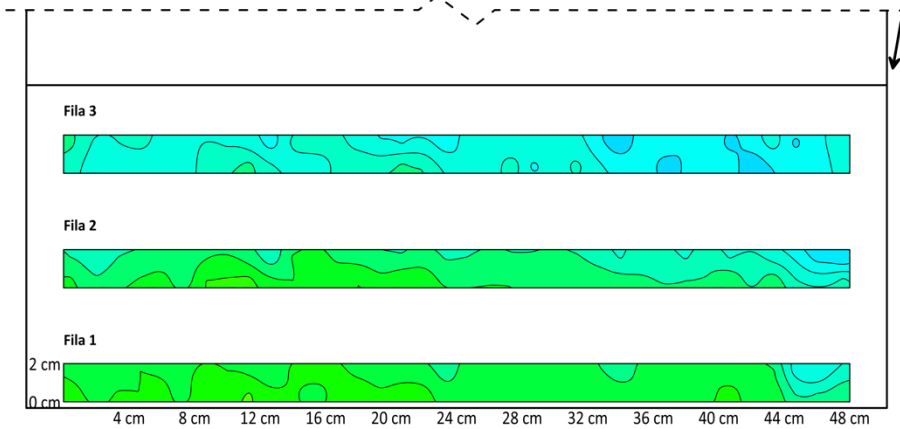
→ Ángulo de incidencia del viento

**$C_{pn\_m}$  160 grados terreno categoría 1**



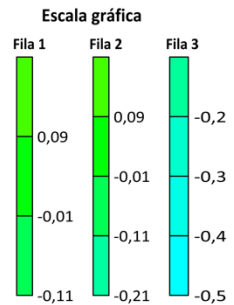
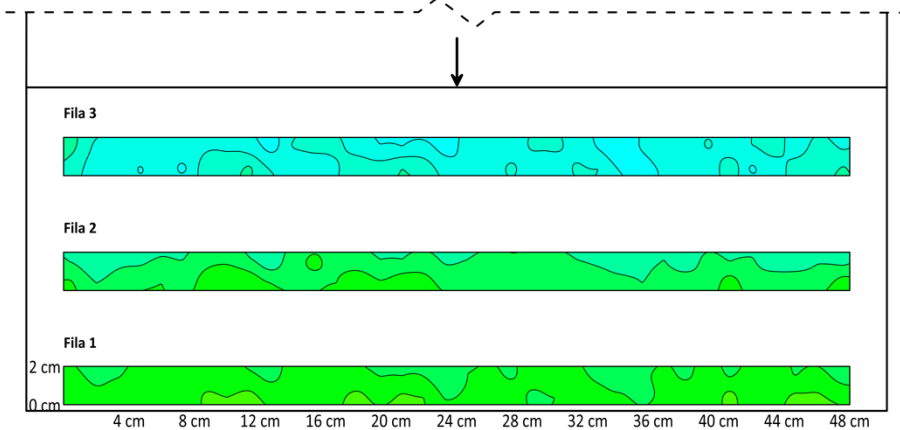
→ Ángulo de incidencia del viento

**$C_{pn\_m}$  170 grados terreno categoría 1**



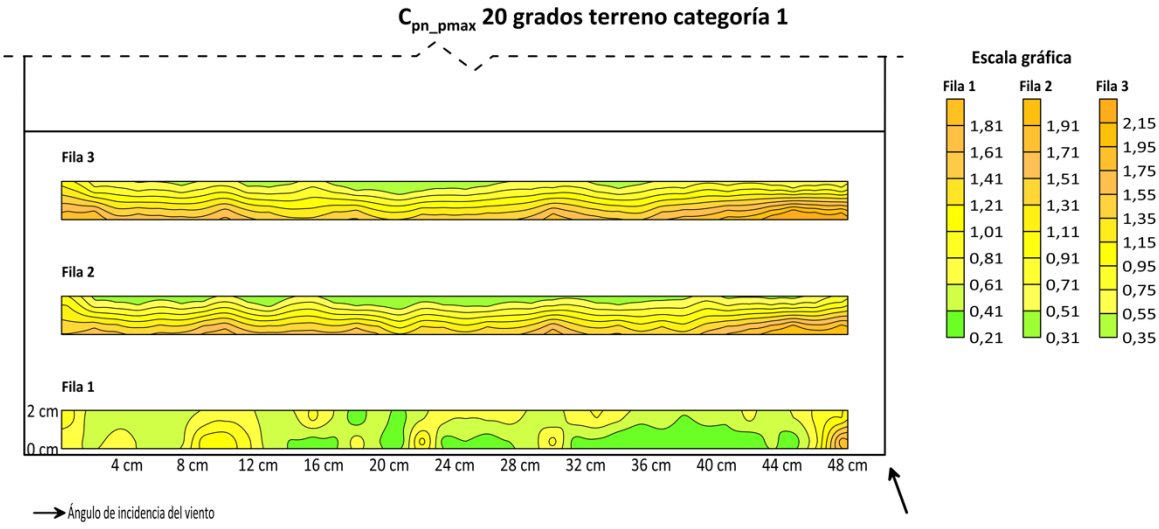
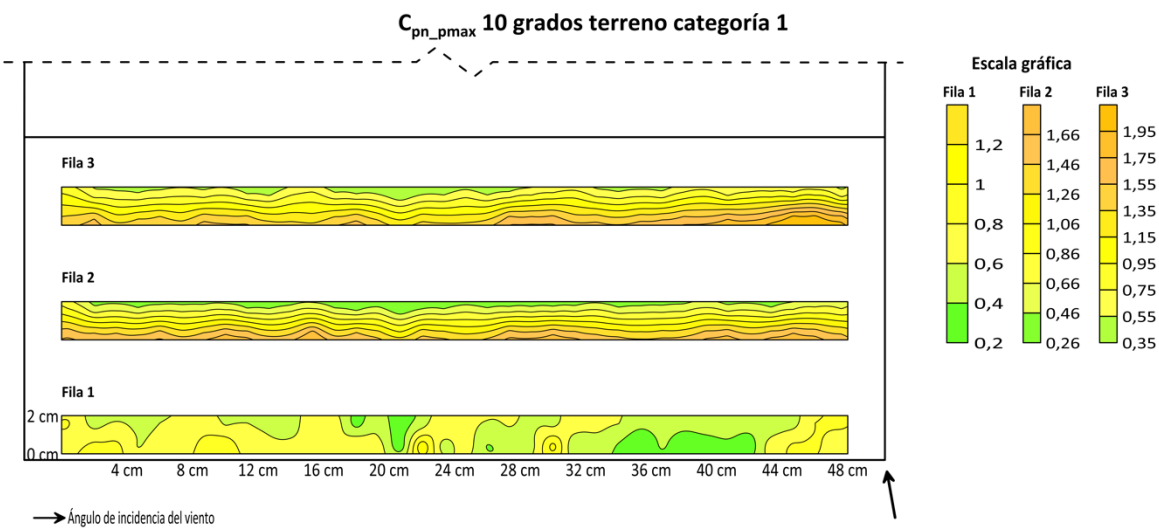
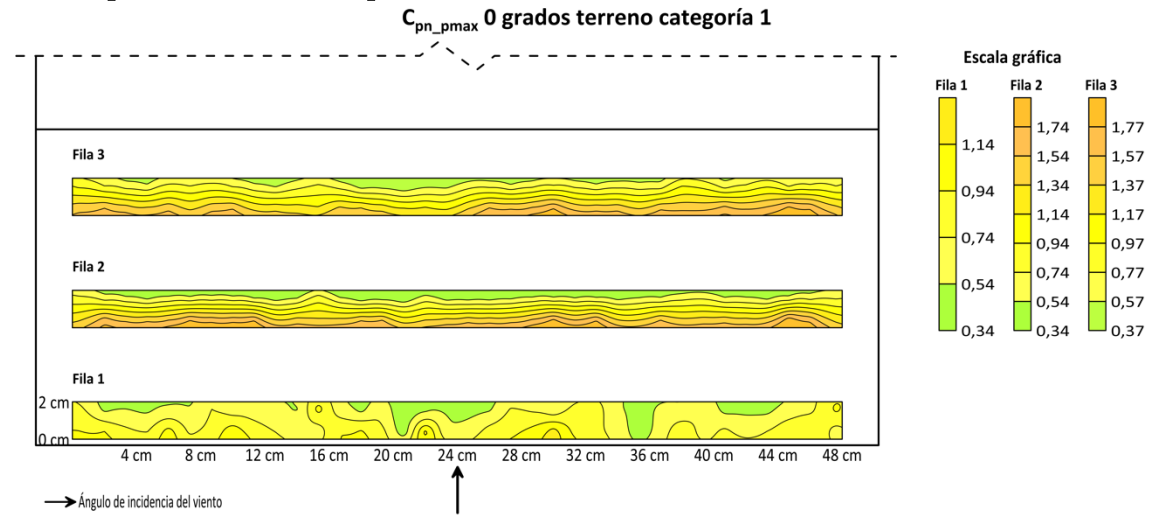
→ Ángulo de incidencia del viento

**$C_{pn\_m}$  180 grados terreno categoría 1**



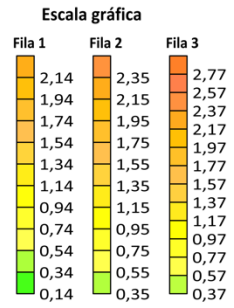
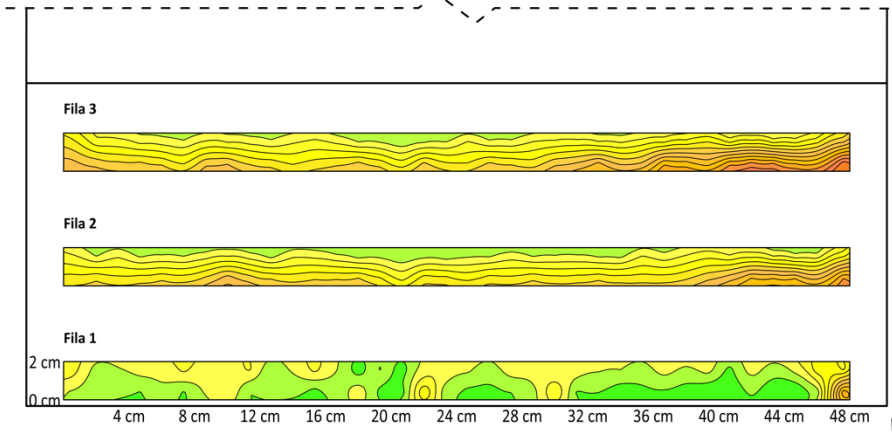
→ Ángulo de incidencia del viento

**Apéndice B. Mapas de coeficientes de presión neta, valores picos máximos ( $C_{pn\_pmax}$ ), terreno categoría 1 [elaboración propia]**



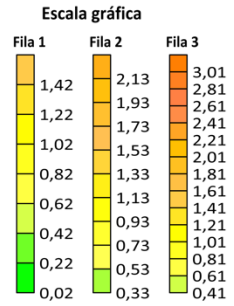
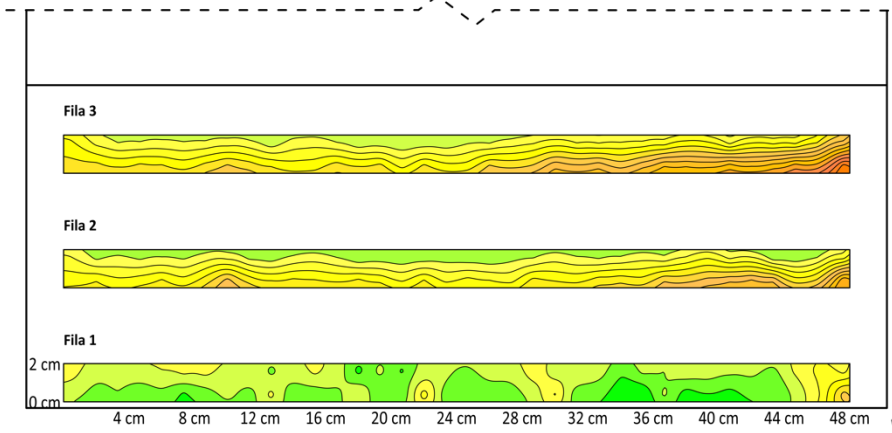


$C_{pn\_pmax}$  30 grados terreno categoría 1



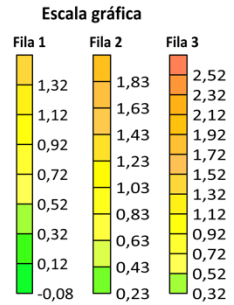
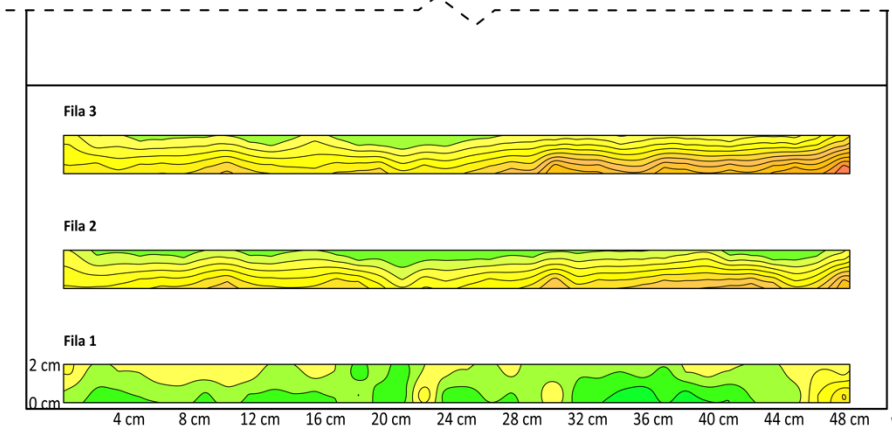
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmax}$  40 grados terreno categoría 1



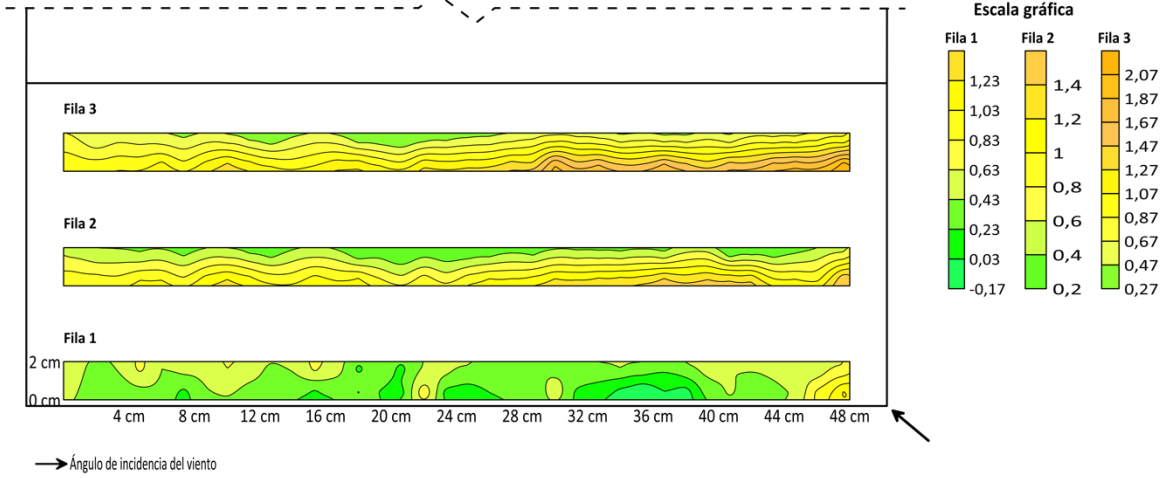
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmax}$  45 grados terreno categoría 1

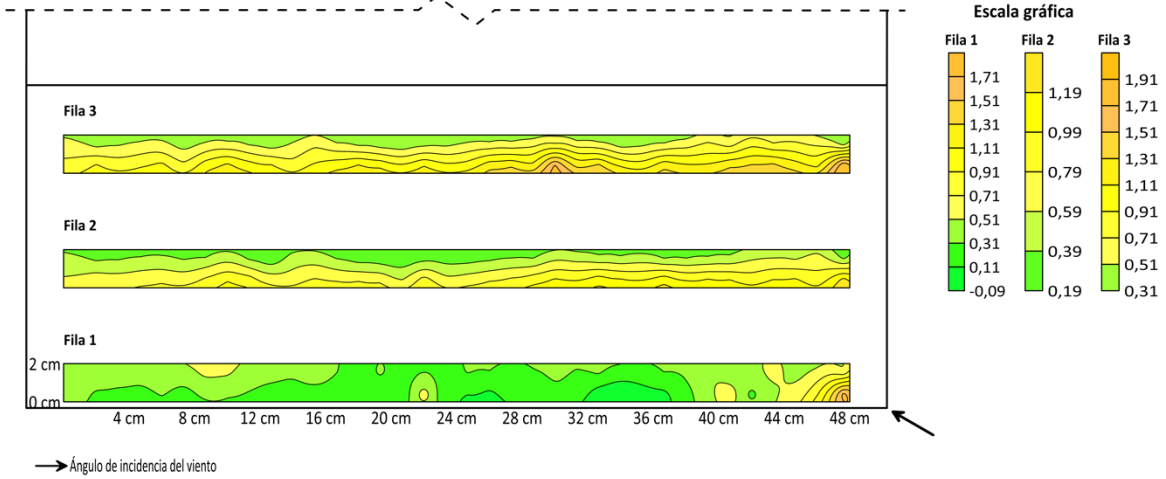


→ Ángulo de incidencia del viento

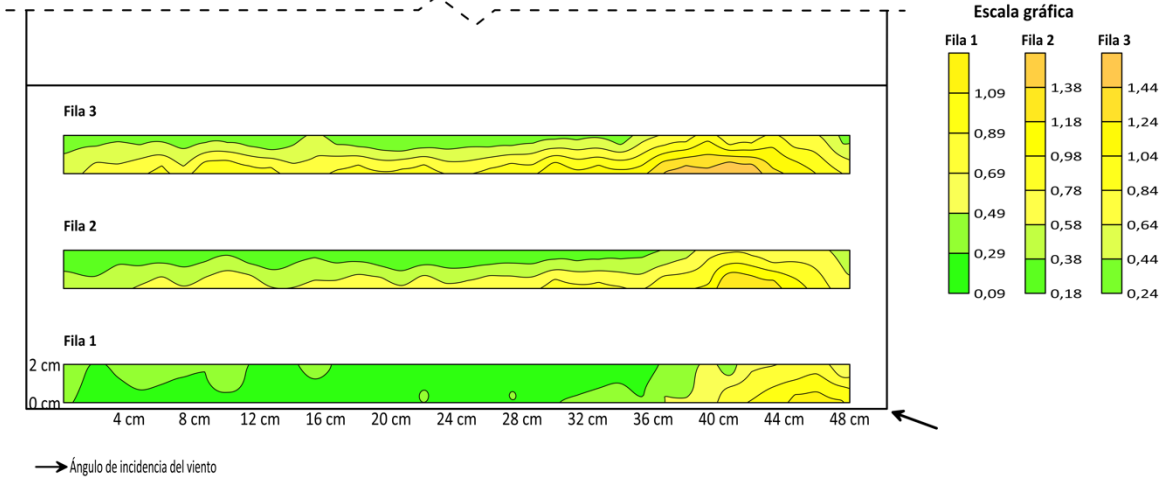
$C_{pn\_pmax}$  50 grados terreno categoría 1



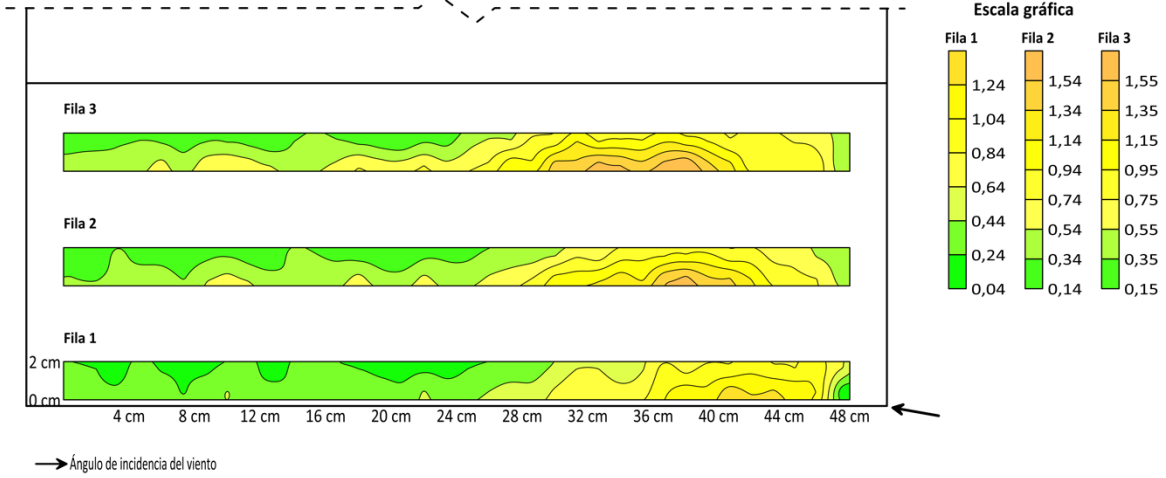
$C_{pn\_pmax}$  60 grados terreno categoría 1



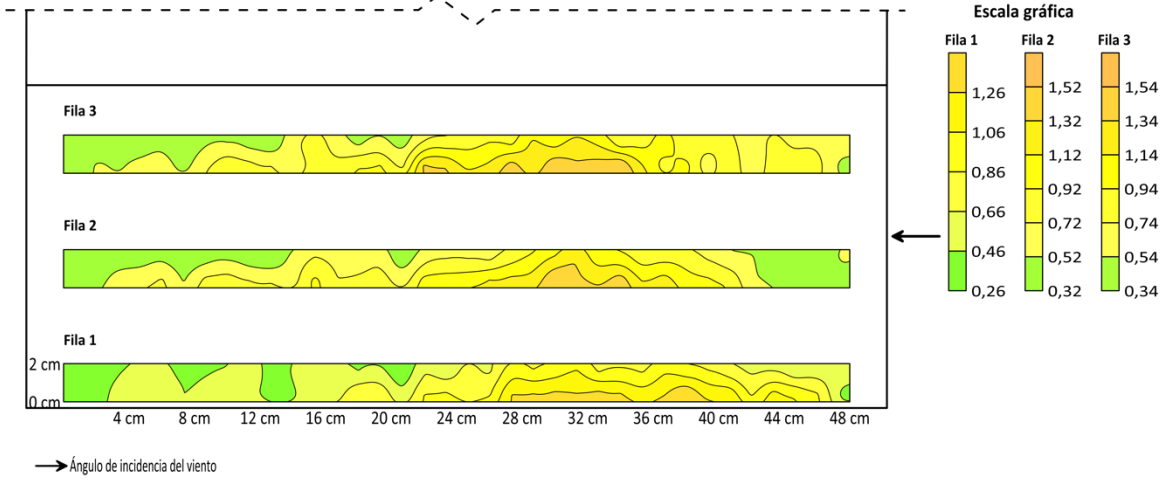
$C_{pn\_pmax}$  70 grados terreno categoría 1



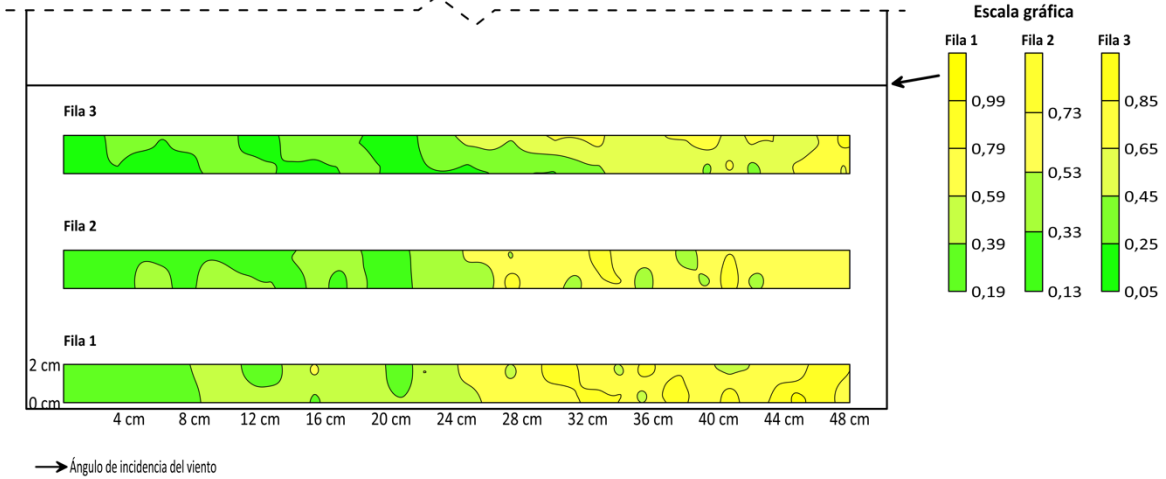
$C_{pn\_pmax}$  80 grados terreno categoría 1



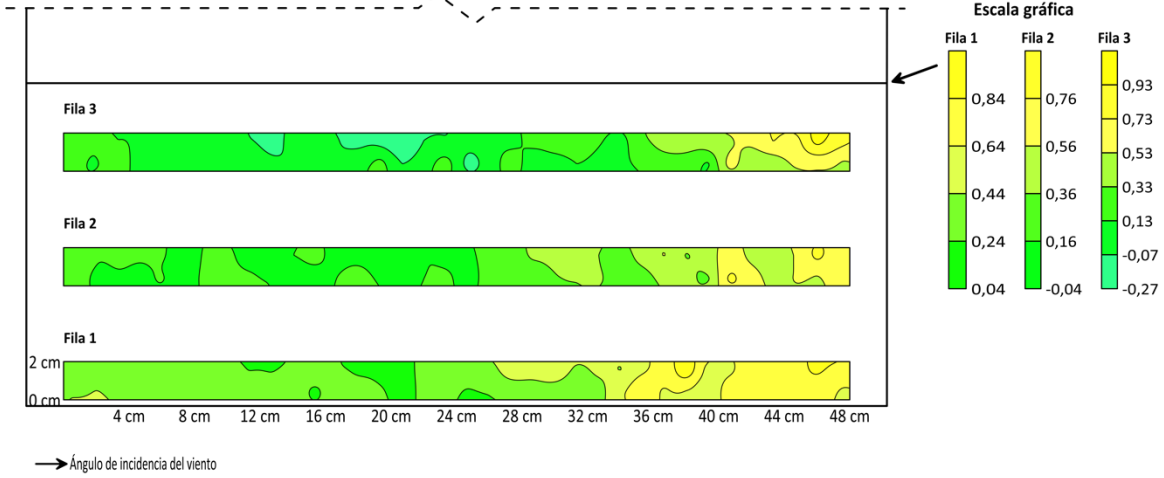
$C_{pn\_pmax}$  90 grados terreno categoría 1



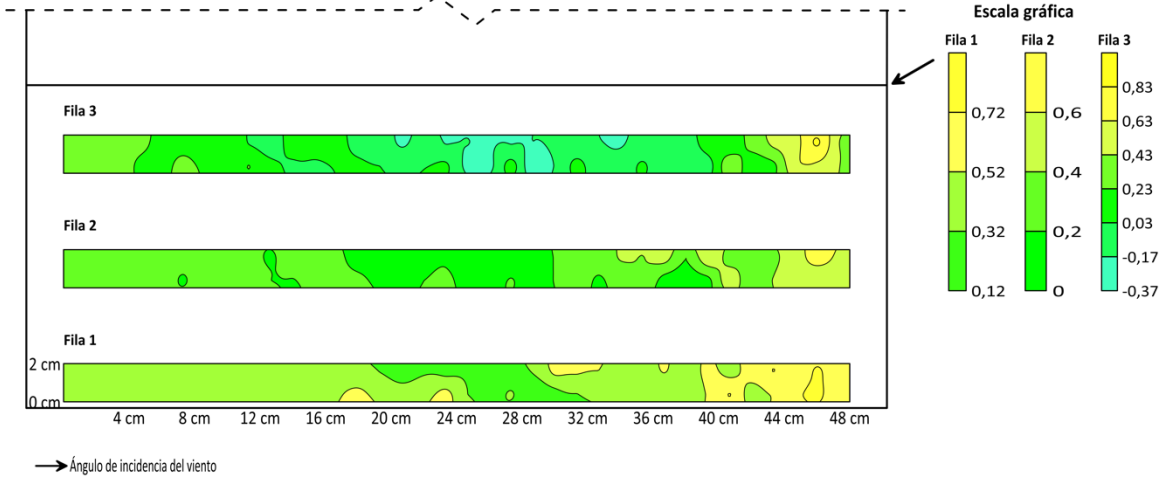
$C_{pn\_pmax}$  100 grados terreno categoría 1



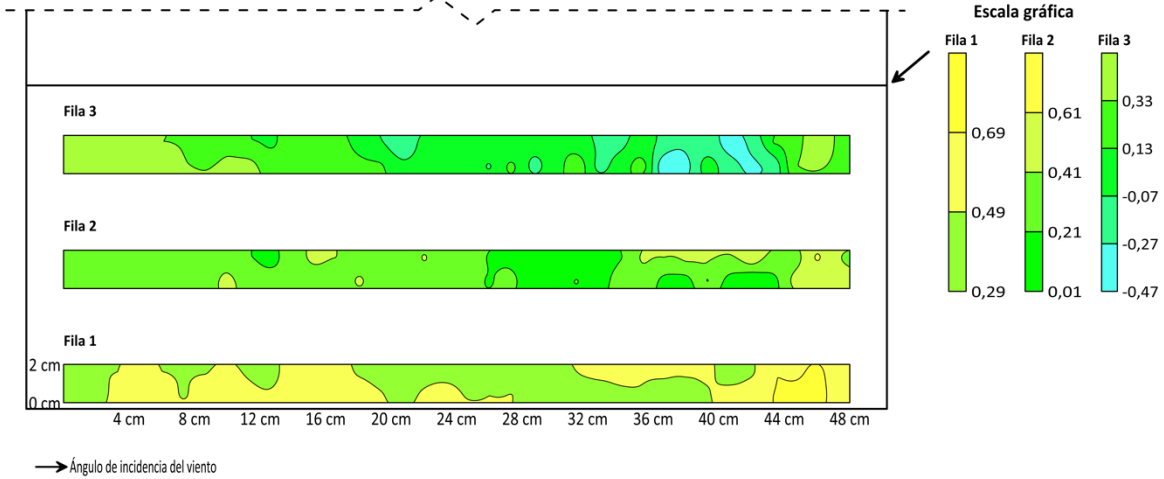
$C_{pn\_pmax}$  110 grados terreno categoría 1



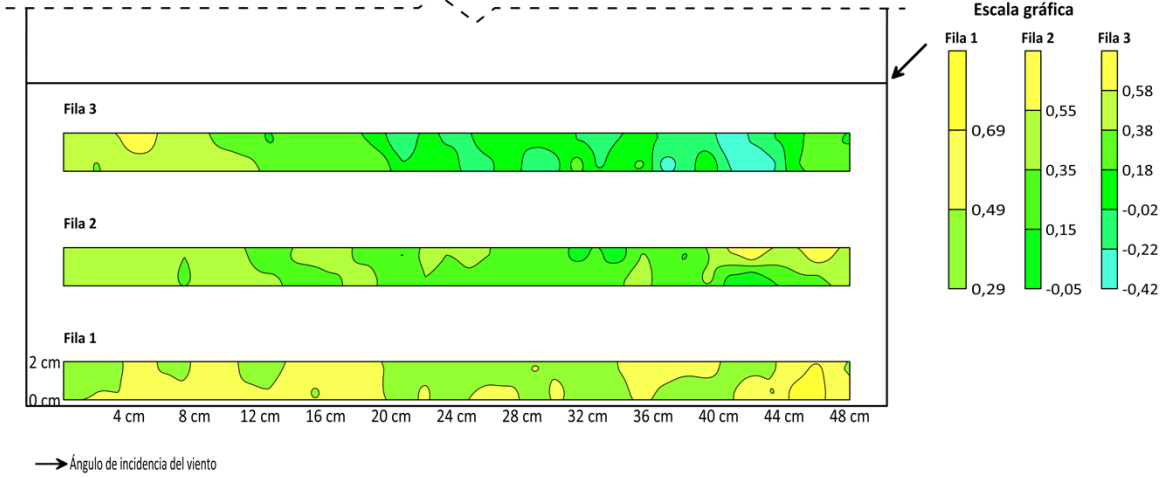
$C_{pn\_pmax}$  120 grados terreno categoría 1



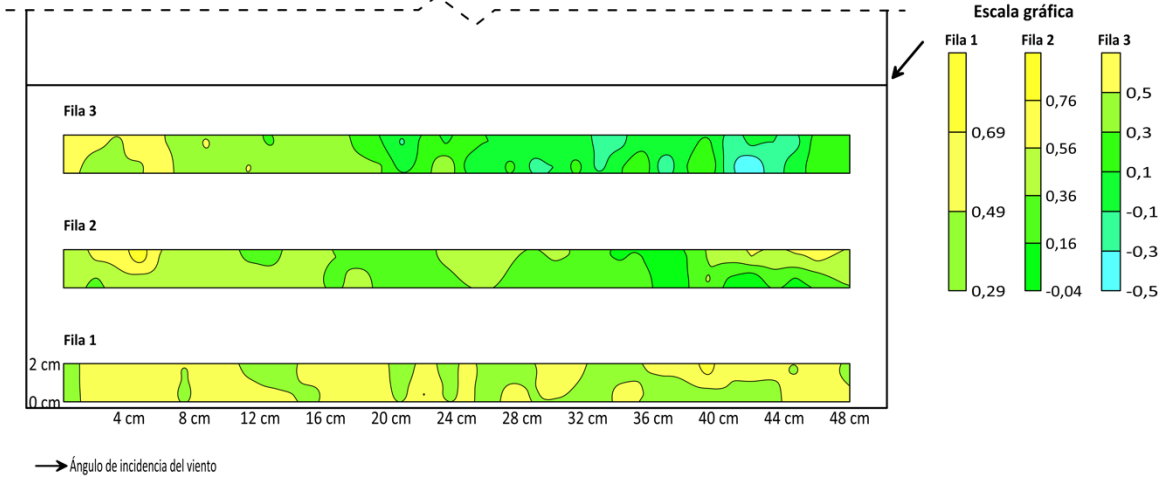
$C_{pn\_pmax}$  130 grados terreno categoría 1



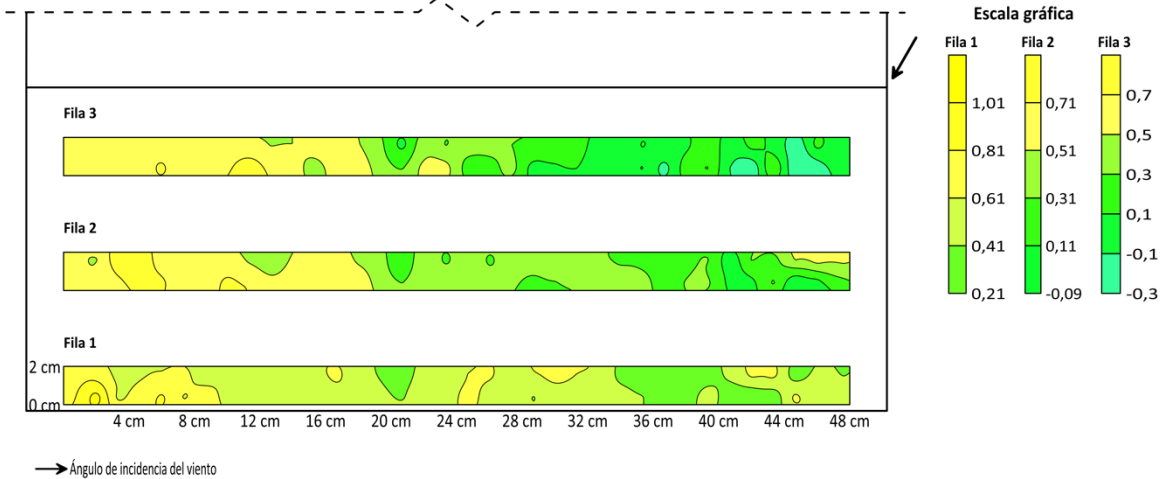
$C_{pn\_pmax}$  135 grados terreno categoría 1



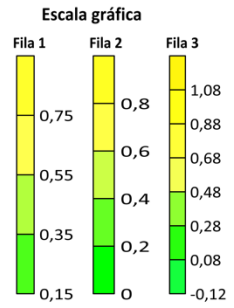
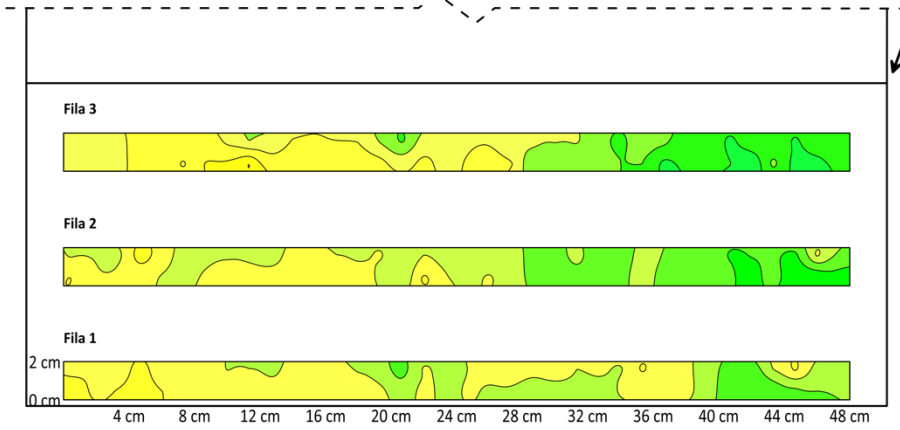
$C_{pn\_pmax}$  140 grados terreno categoría 1



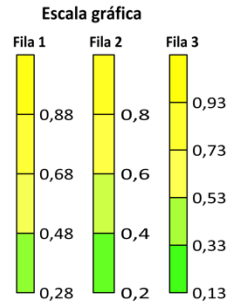
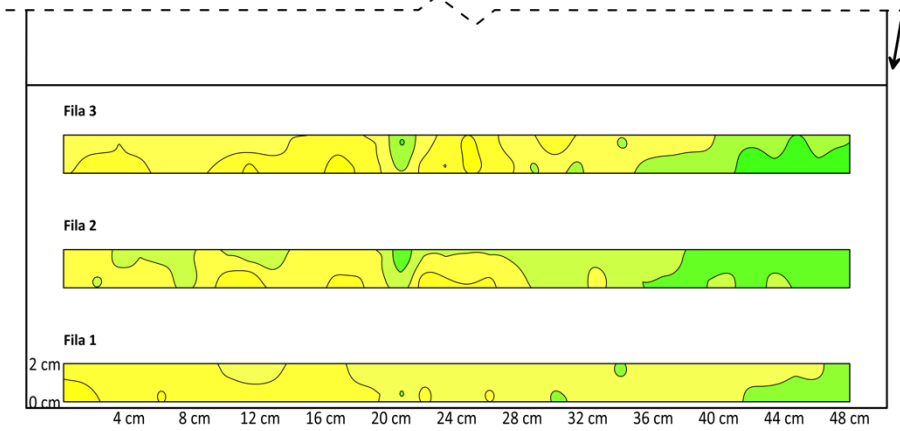
$C_{pn\_pmax}$  150 grados terreno categoría 1



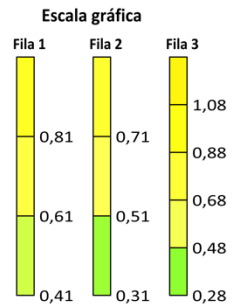
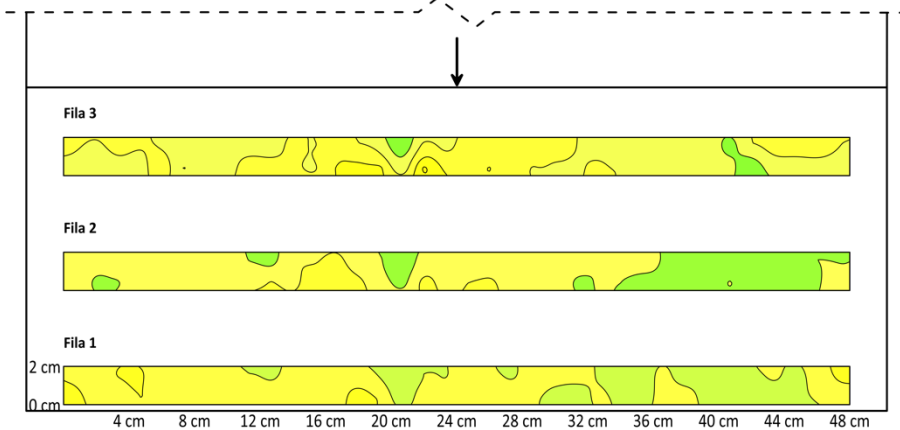
$C_{pn\_pmax}$  160 grados terreno categoría 1



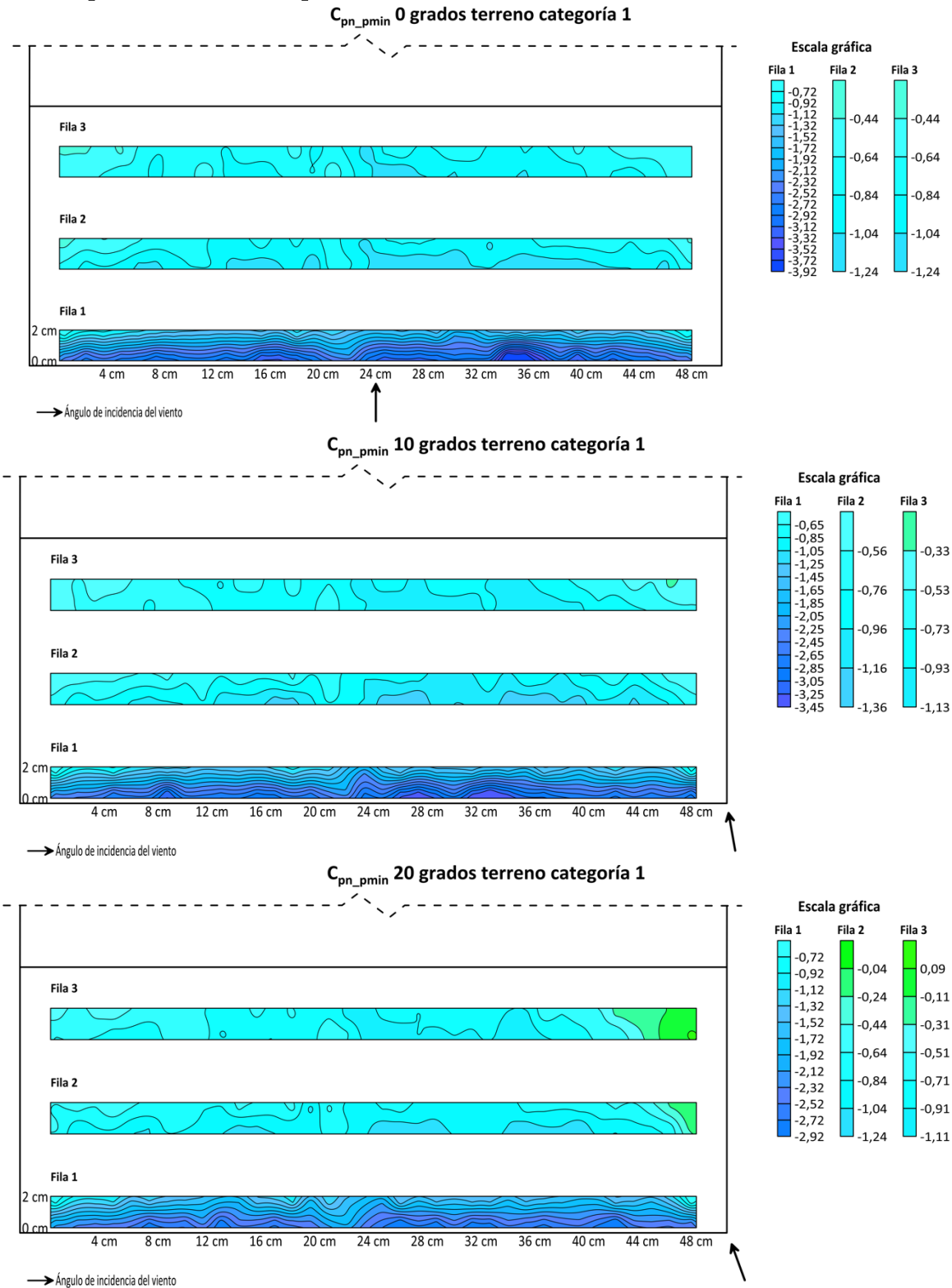
$C_{pn\_pmax}$  170 grados terreno categoría 1



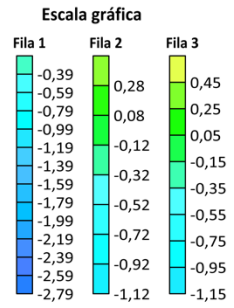
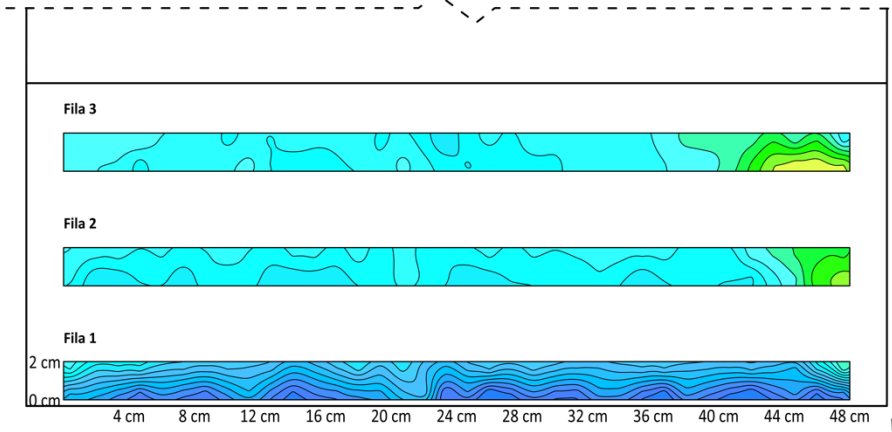
$C_{pn\_pmax}$  180 grados terreno categoría 1



**Apéndice C. Mapas de coeficientes de presión neta, valores picos mínimos ( $C_{pn\_pmin}$ ), terreno categoría 1 [elaboración propia]**

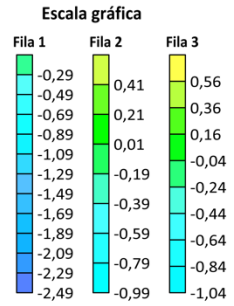
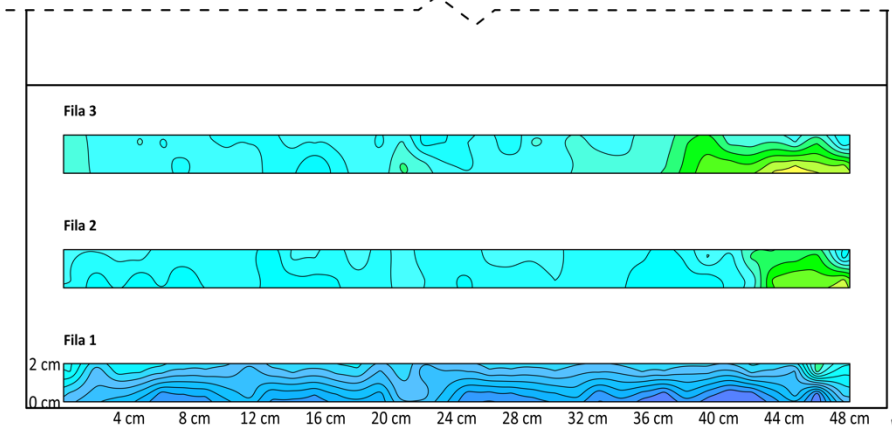


$C_{pn\_pmin}$  30 grados terreno categoría 1



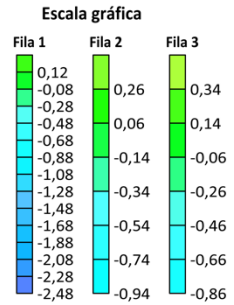
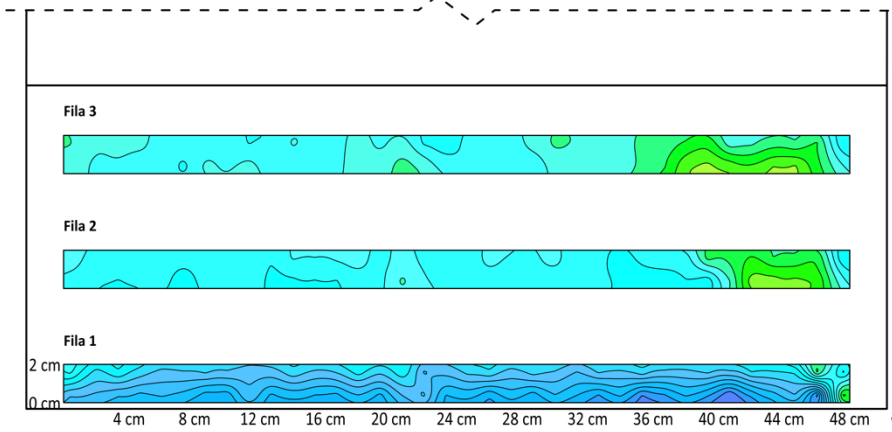
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  40 grados terreno categoría 1



→ Ángulo de incidencia del viento

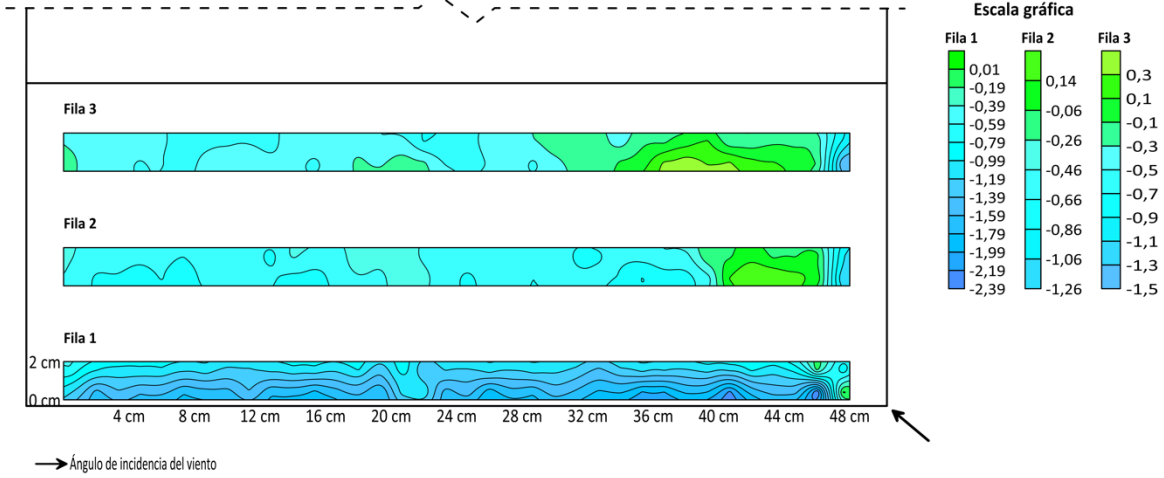
$C_{pn\_pmin}$  45 grados terreno categoría 1



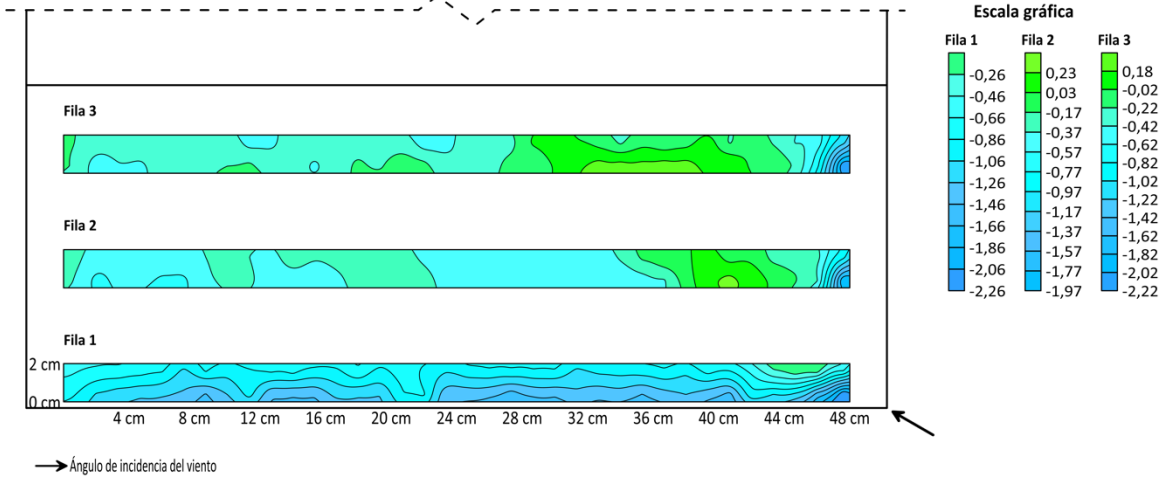
→ Ángulo de incidencia del viento



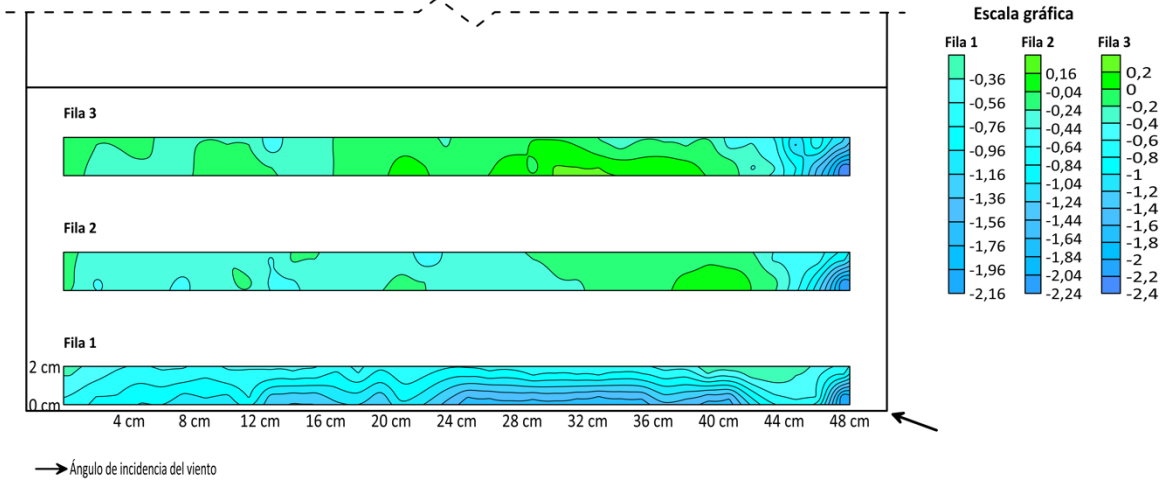
$C_{pn\_pmin}$  50 grados terreno categoría 1



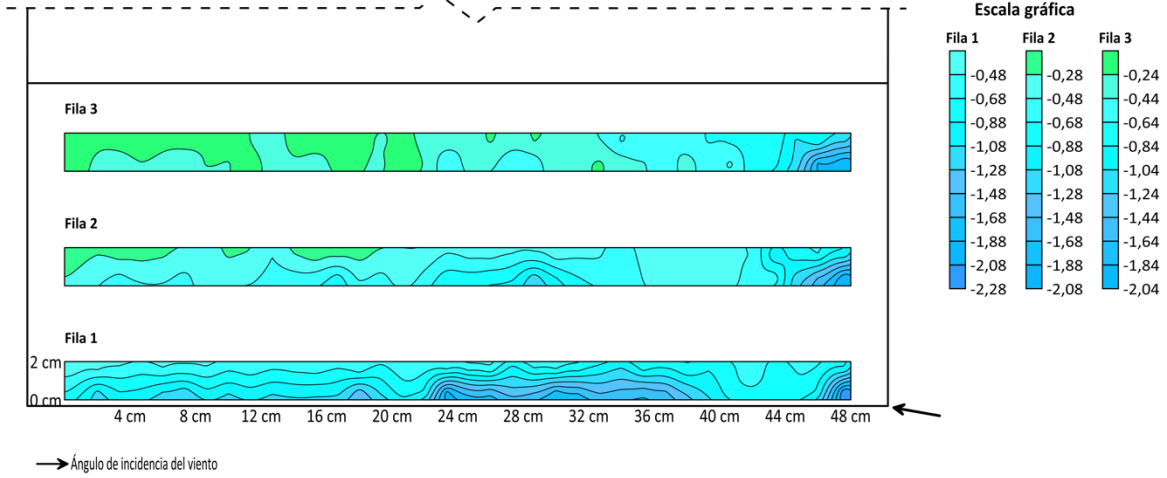
$C_{pn\_pmin}$  60 grados terreno categoría 1



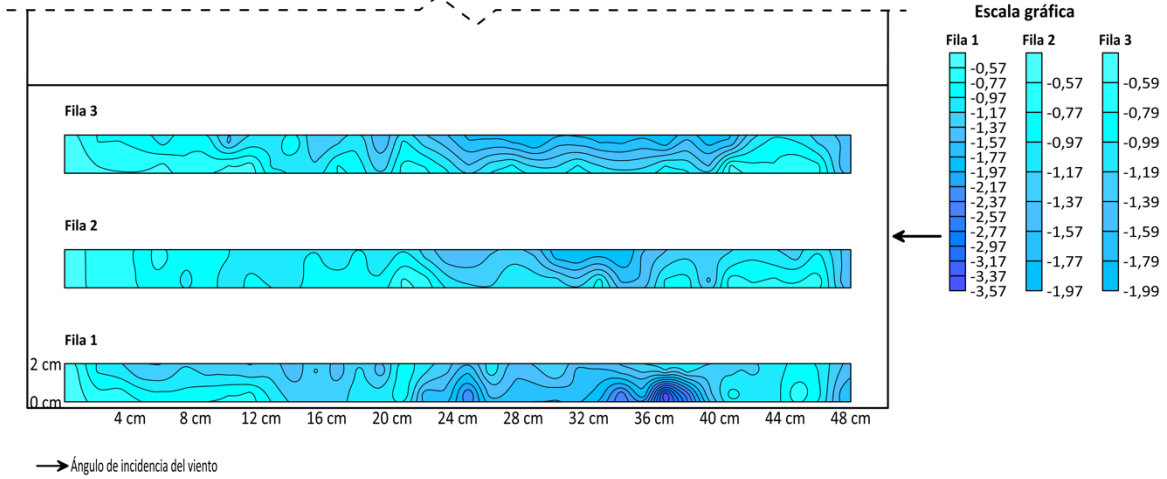
$C_{pn\_pmin}$  70 grados terreno categoría 1



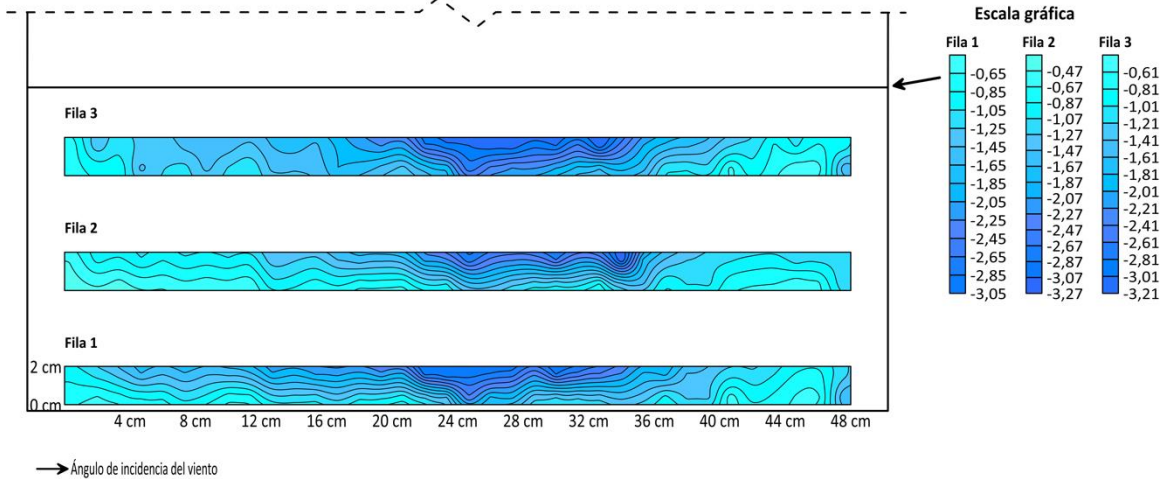
$C_{pn\_pmin}$  80 grados terreno categoría 1



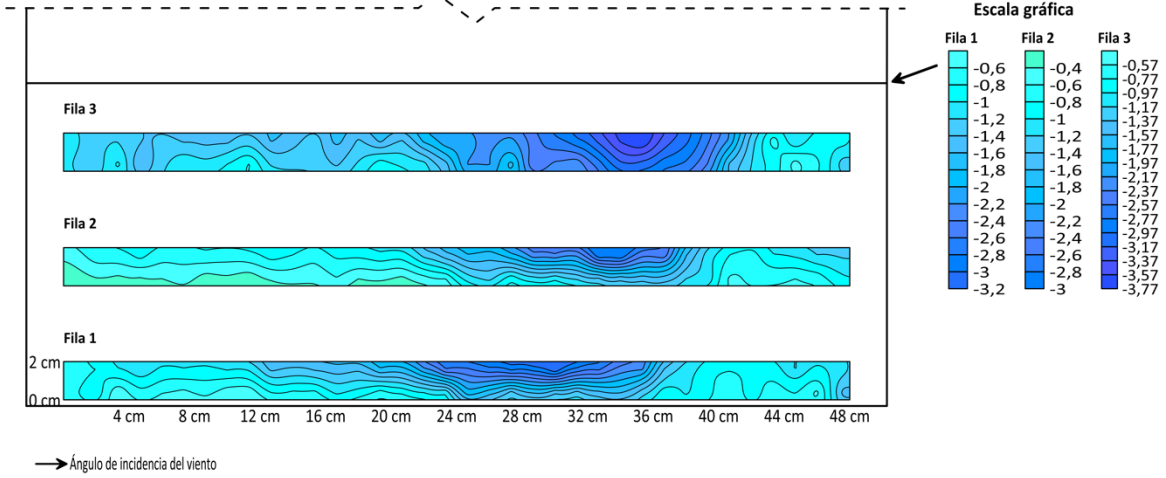
$C_{pn\_pmin}$  90 grados terreno categoría 1



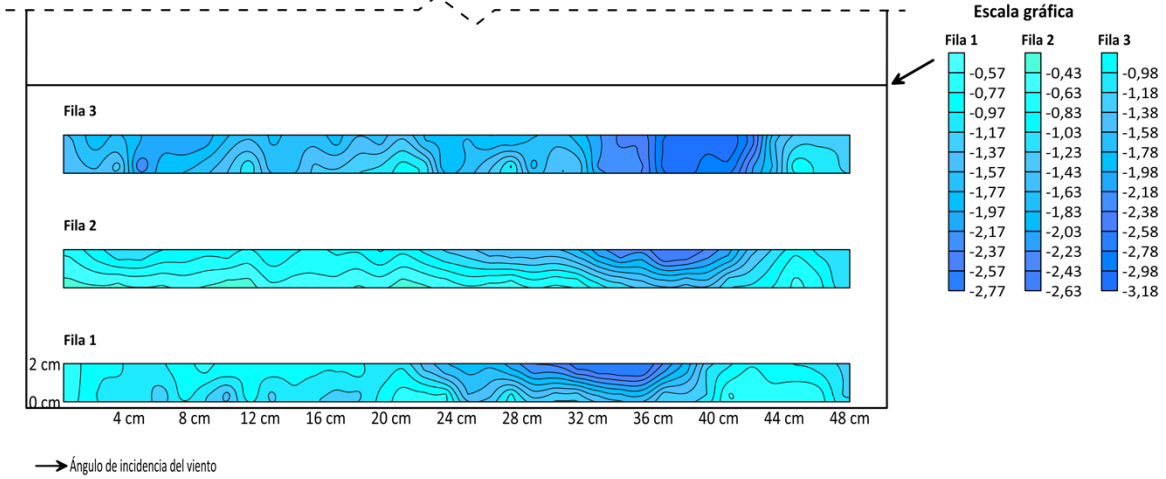
$C_{pn\_pmin}$  100 grados terreno categoría 1



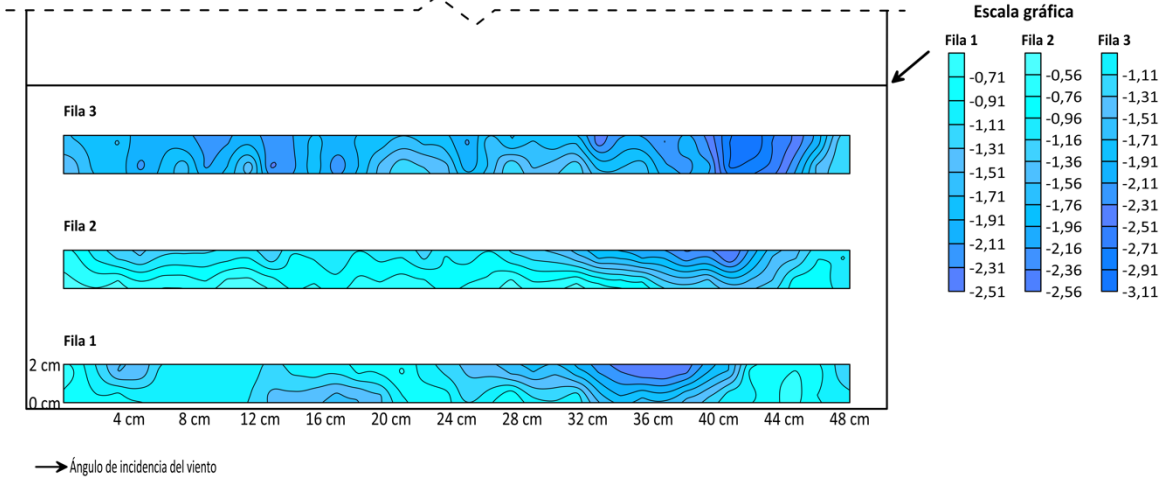
$C_{pn\_pmin}$  110 grados terreno categoría 1



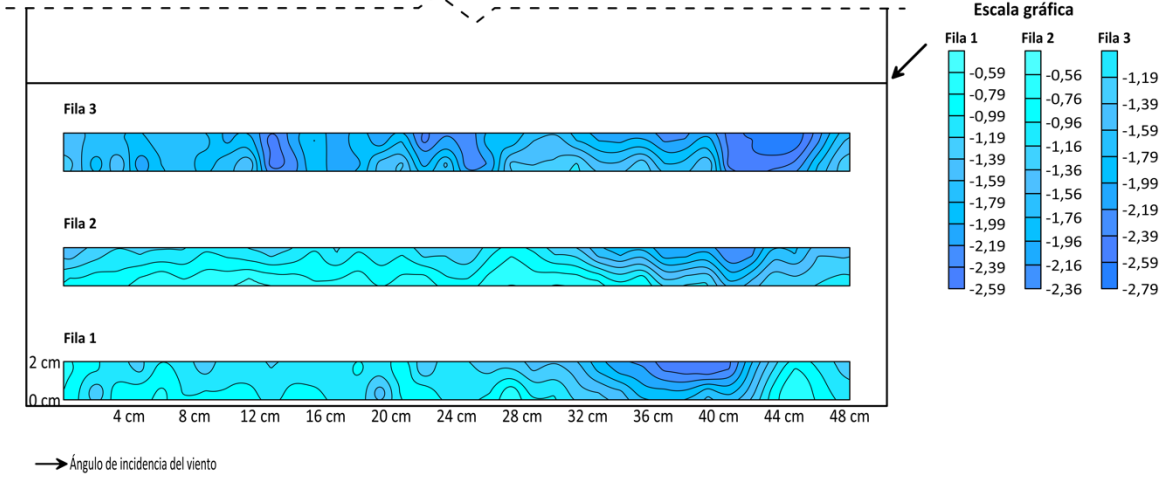
$C_{pn\_pmin}$  120 grados terreno categoría 1



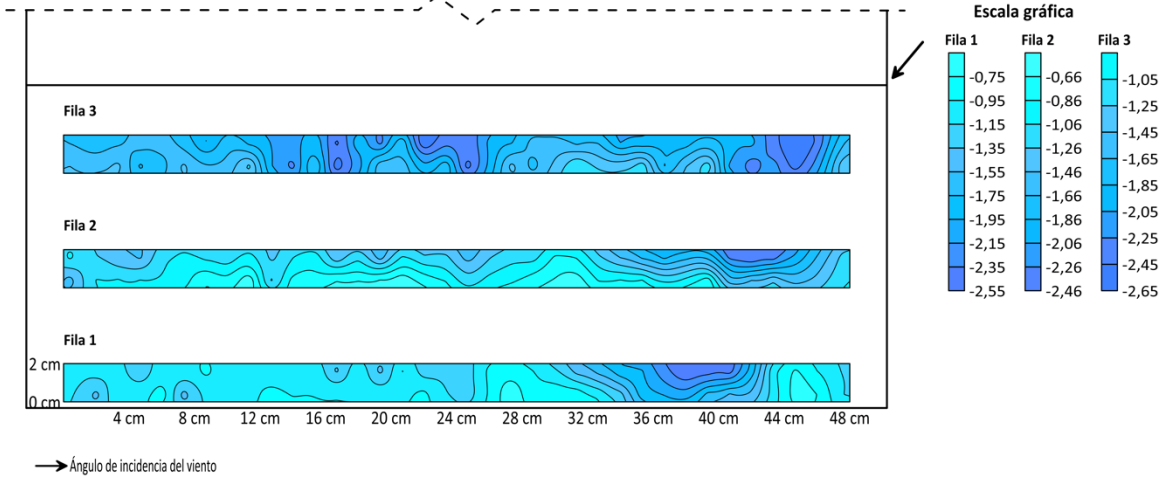
$C_{pn\_pmin}$  130 grados terreno categoría 1



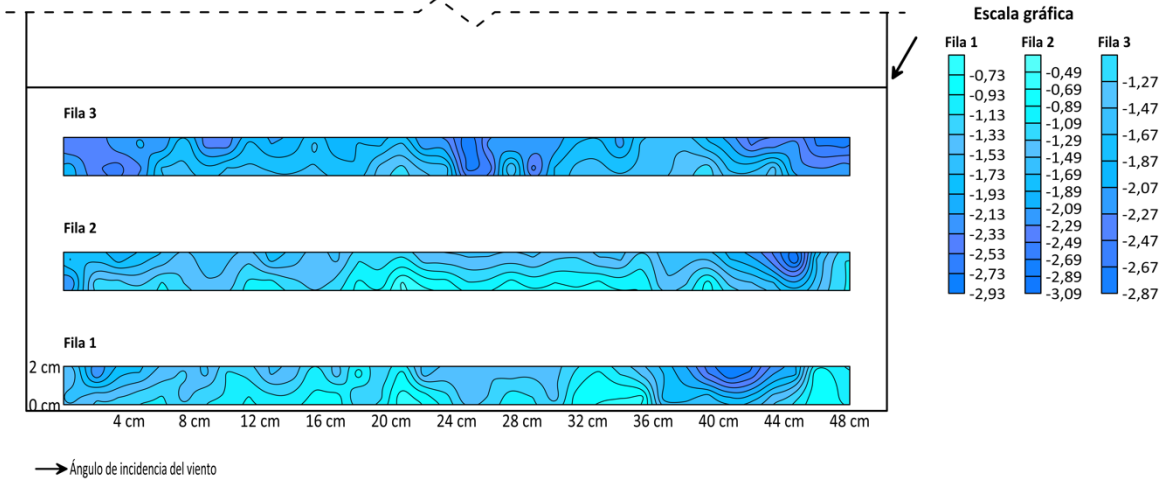
$C_{pn\_pmin}$  135 grados terreno categoría 1



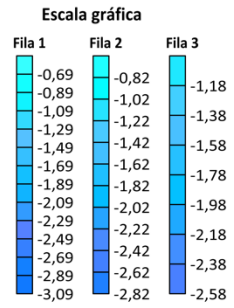
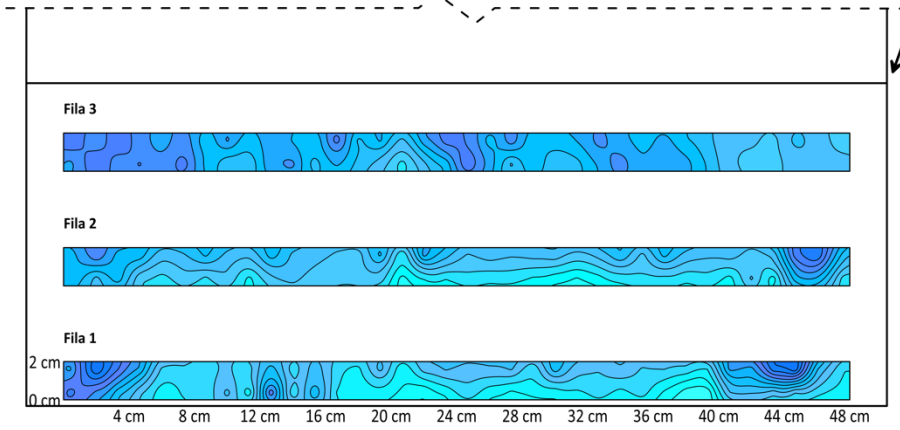
$C_{pn\_pmin}$  140 grados terreno categoría 1



$C_{pn\_pmin}$  150 grados terreno categoría 1

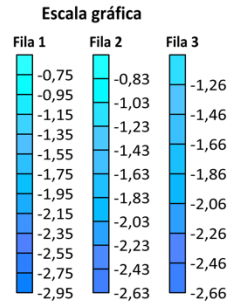
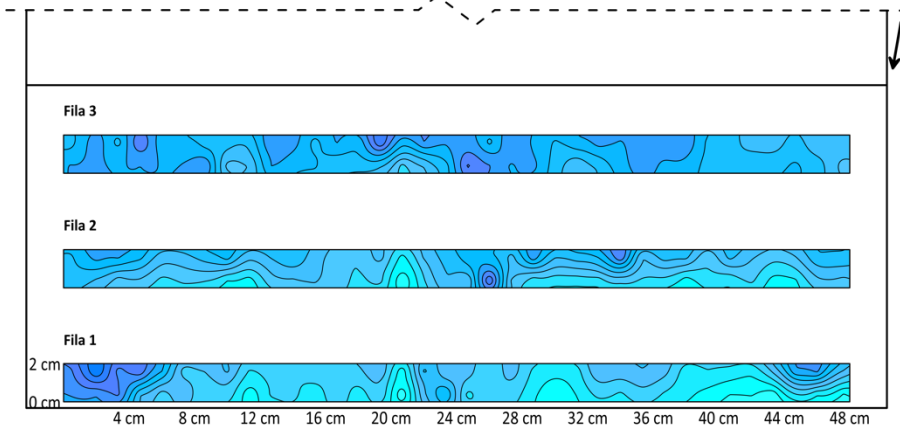


$C_{pn\_pmin}$  160 grados terreno categoría 1



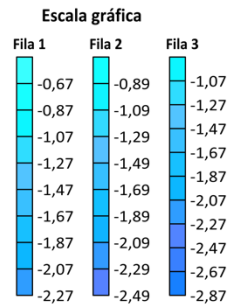
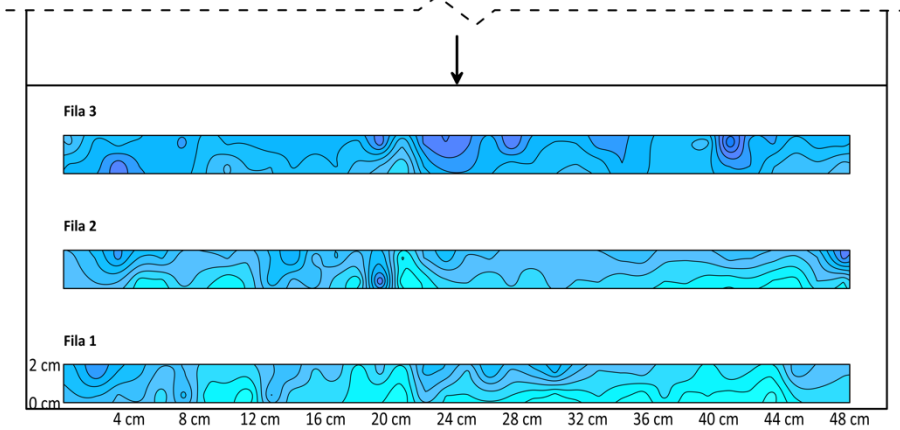
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  170 grados terreno categoría 1



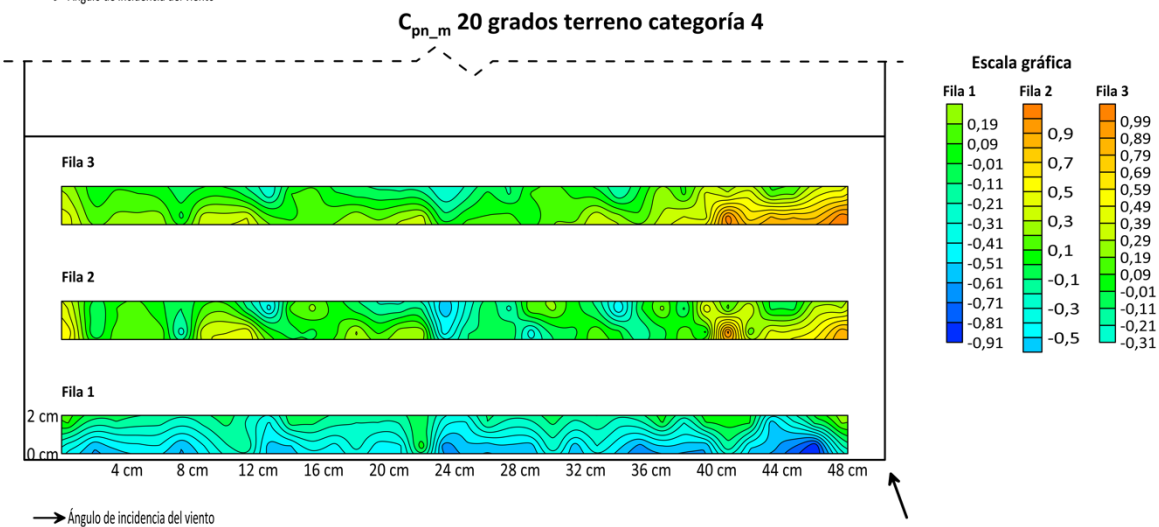
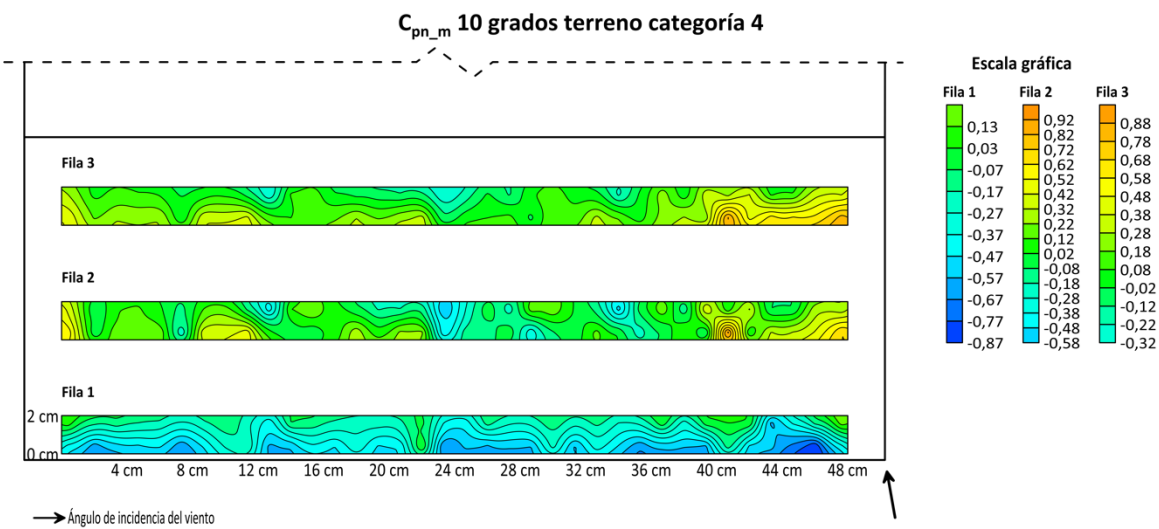
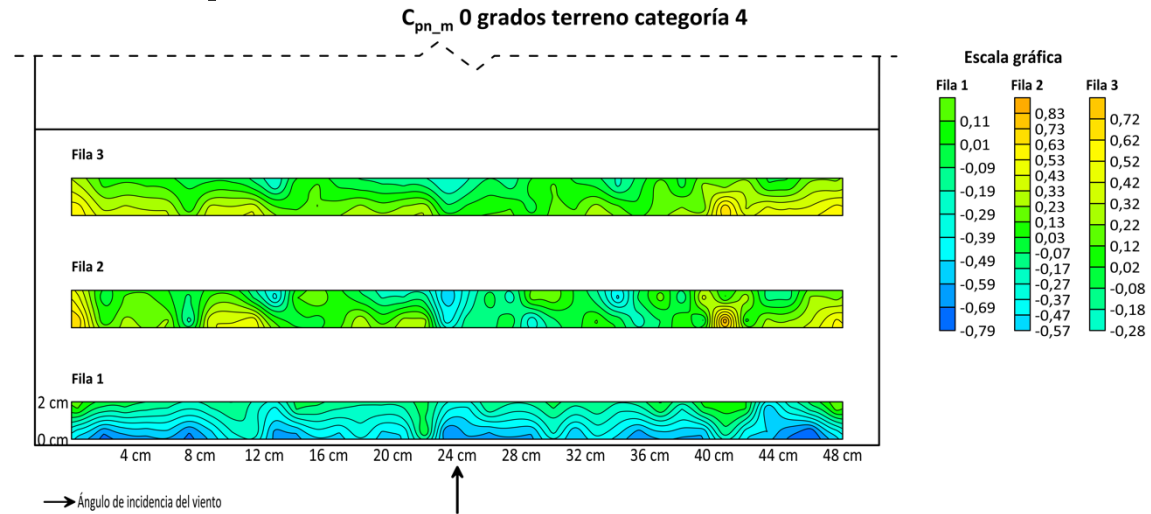
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  180 grados terreno categoría 1

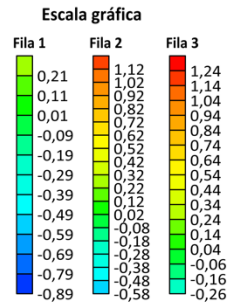
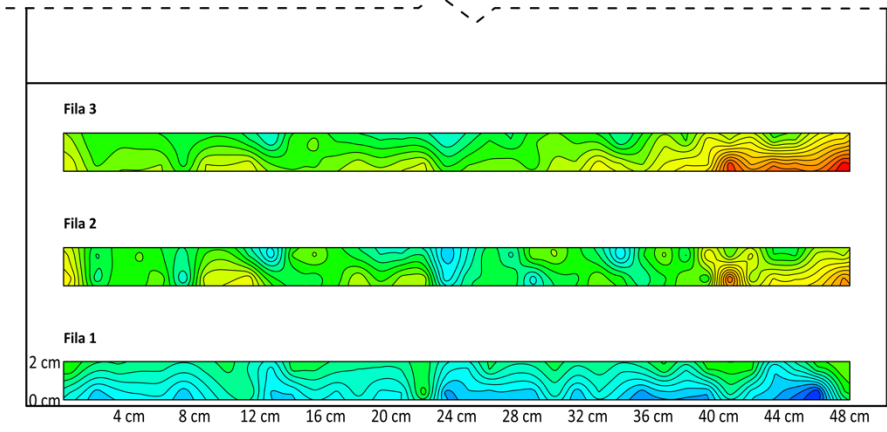


→ Ángulo de incidencia del viento

**Apéndice D. Mapas de coeficientes de presión neta, valores medios ( $C_{pn\_m}$ ), terreno categoría 4 [elaboración propia]**

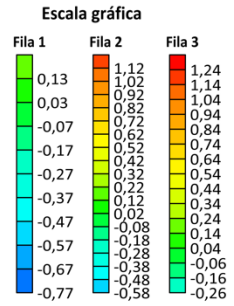
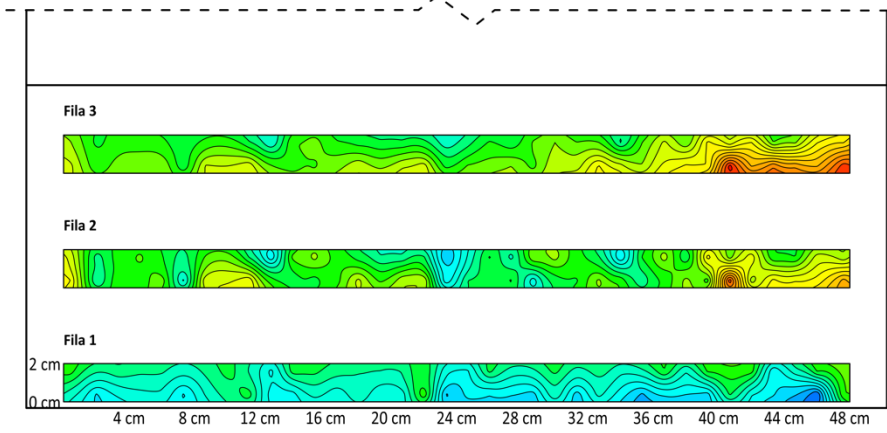


$C_{pn\_m}$  30 grados terreno categoría 4



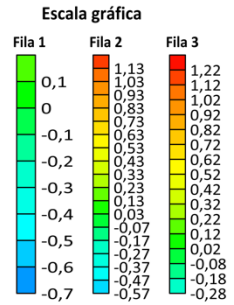
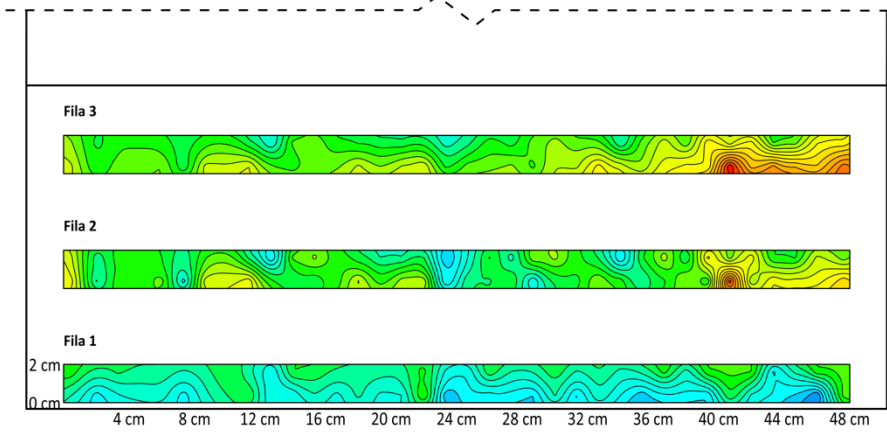
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_m}$  40 grados terreno categoría 4



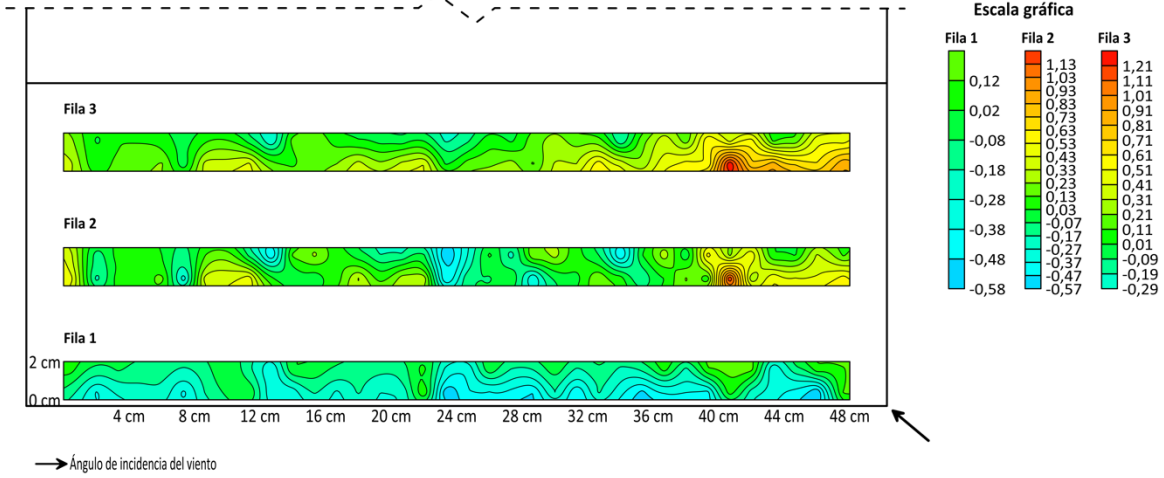
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_m}$  45 grados terreno categoría 4

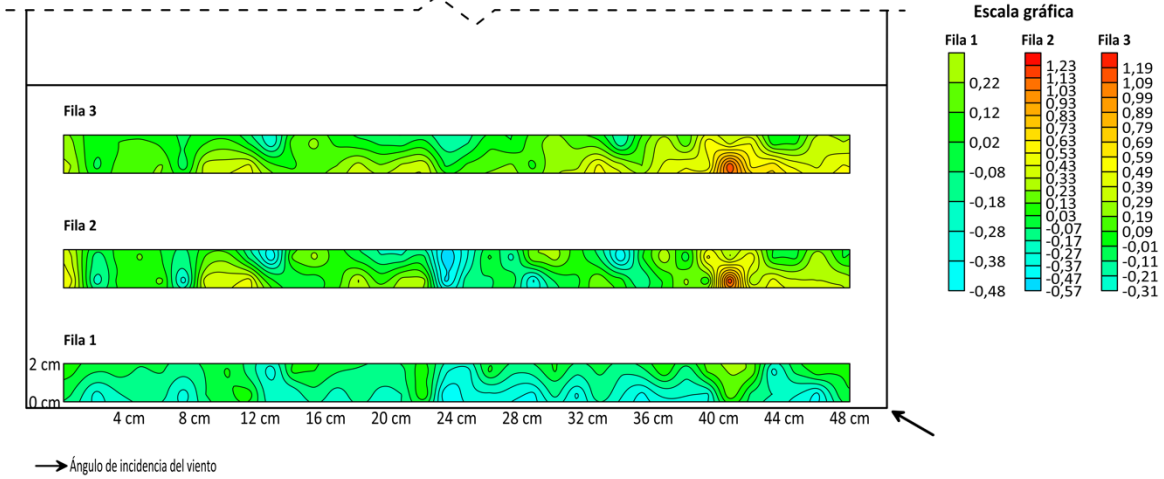


→ Ángulo de incidencia del viento

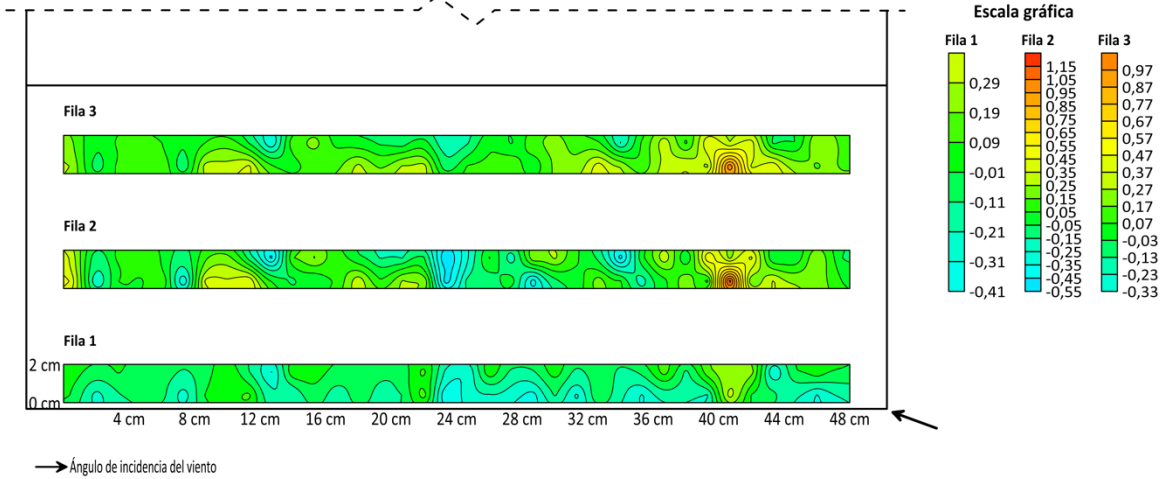
$C_{pn\_m}$  50 grados terreno categoría 4



$C_{pn\_m}$  60 grados terreno categoría 4

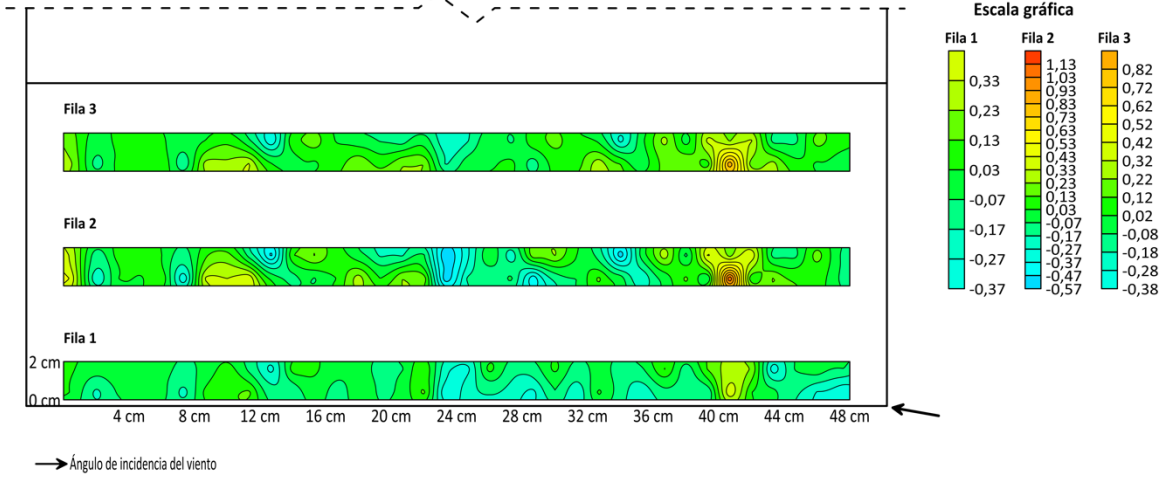


$C_{pn\_m}$  70 grados terreno categoría 4

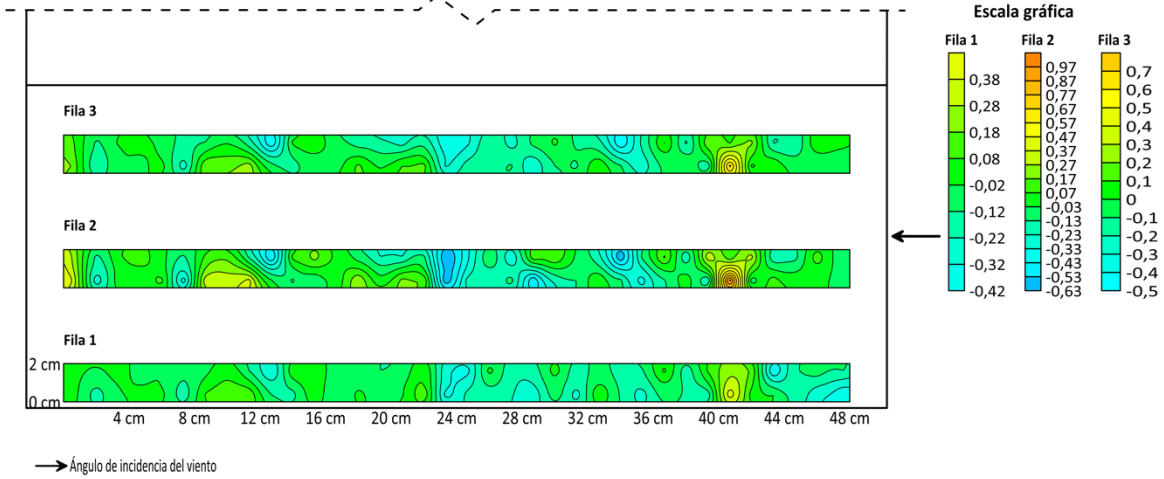




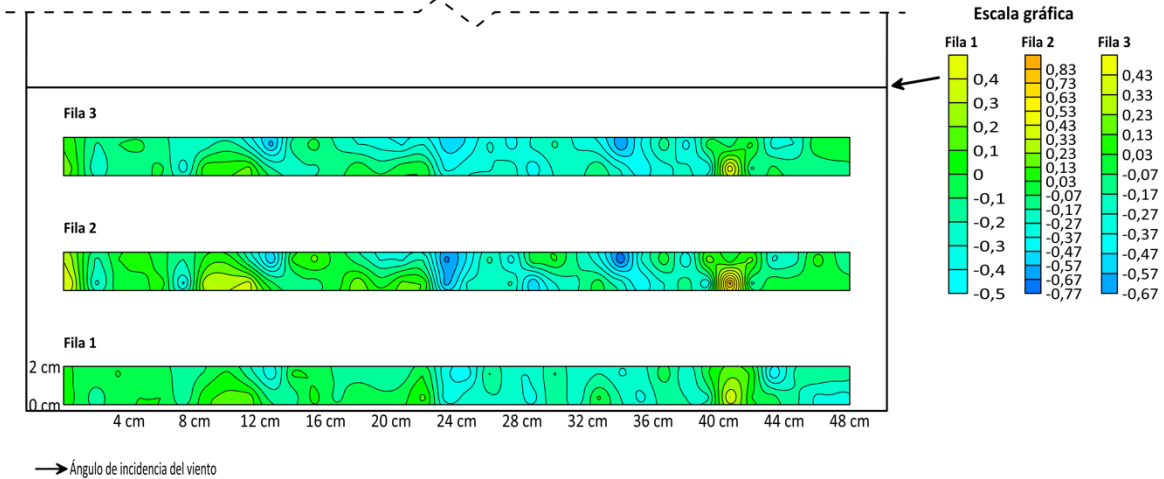
$C_{pn\_m}$  80 grados terreno categoría 4



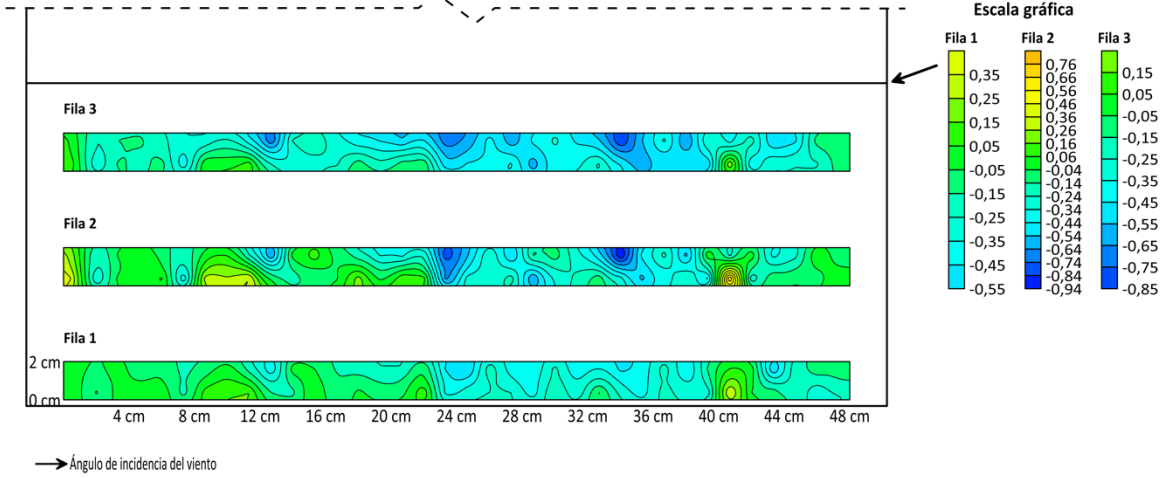
$C_{pn\_m}$  90 grados terreno categoría 4



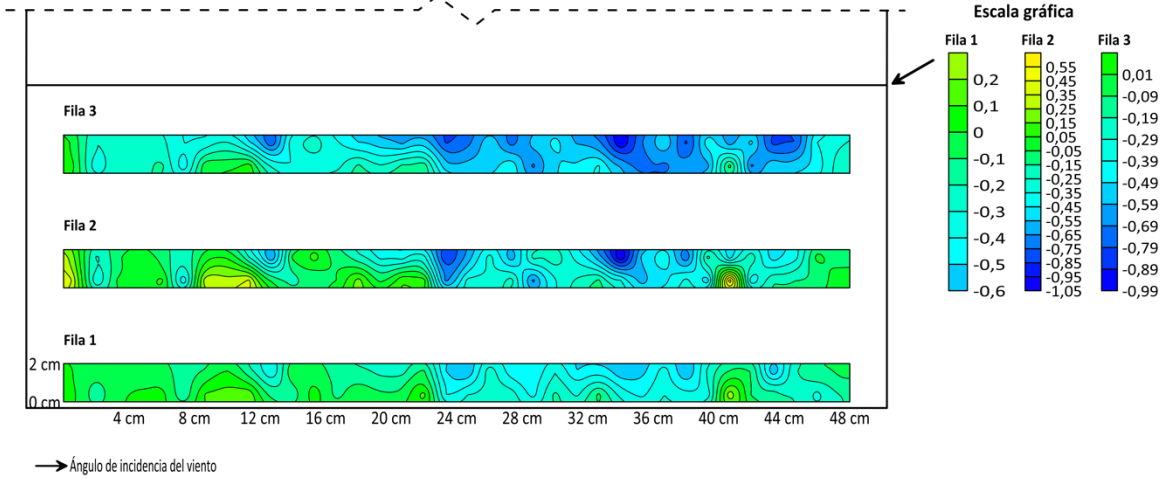
$C_{pn\_m}$  100 grados terreno categoría 4



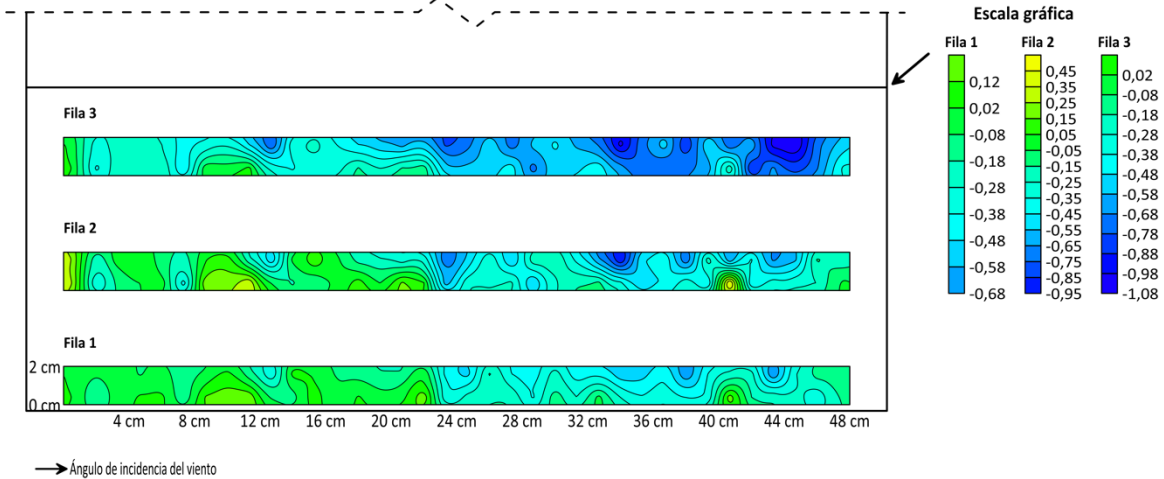
**$C_{pn\_m}$  110 grados terreno categoría 4**



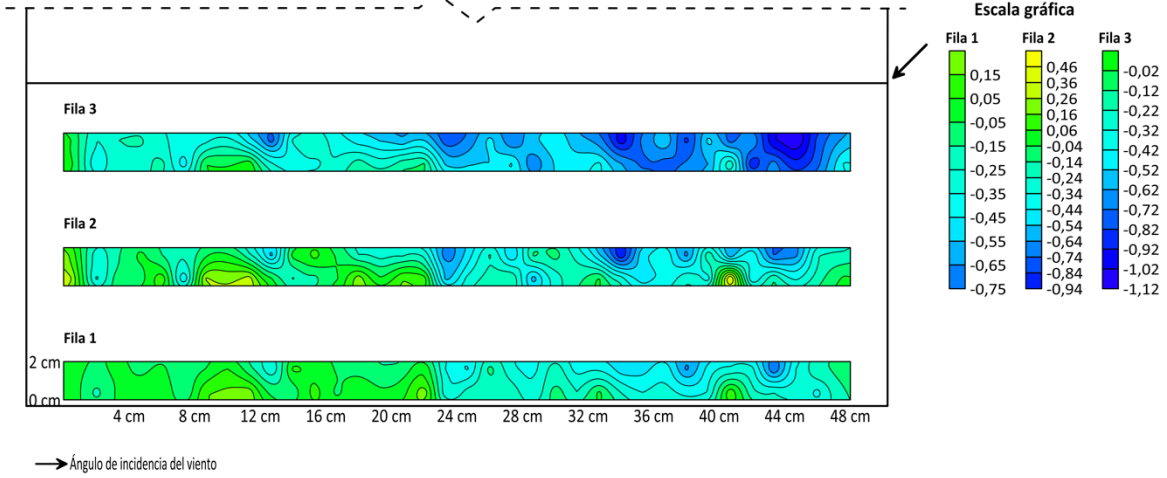
**$C_{pn\_m}$  120 grados terreno categoría 4**



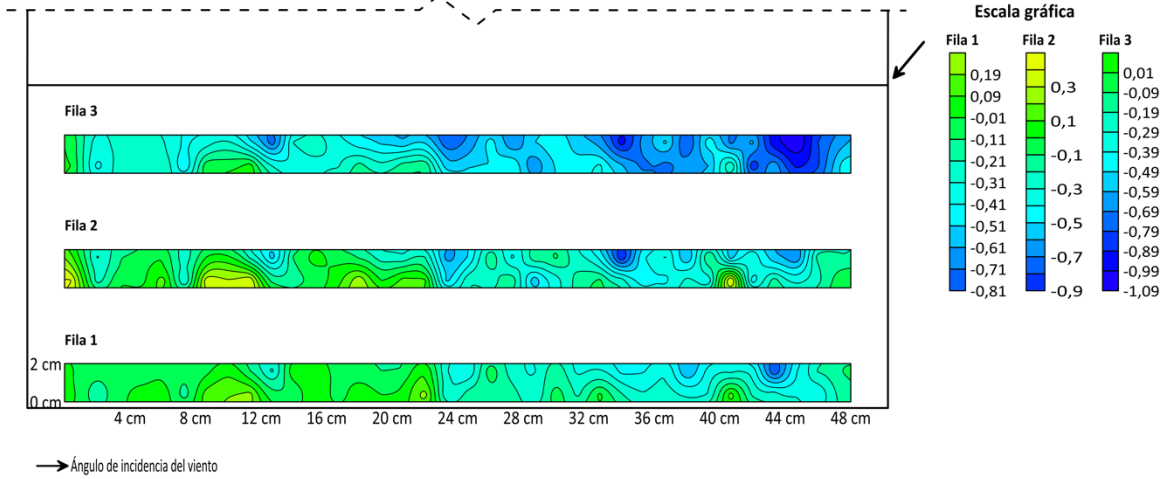
**$C_{pn\_m}$  130 grados terreno categoría 4**



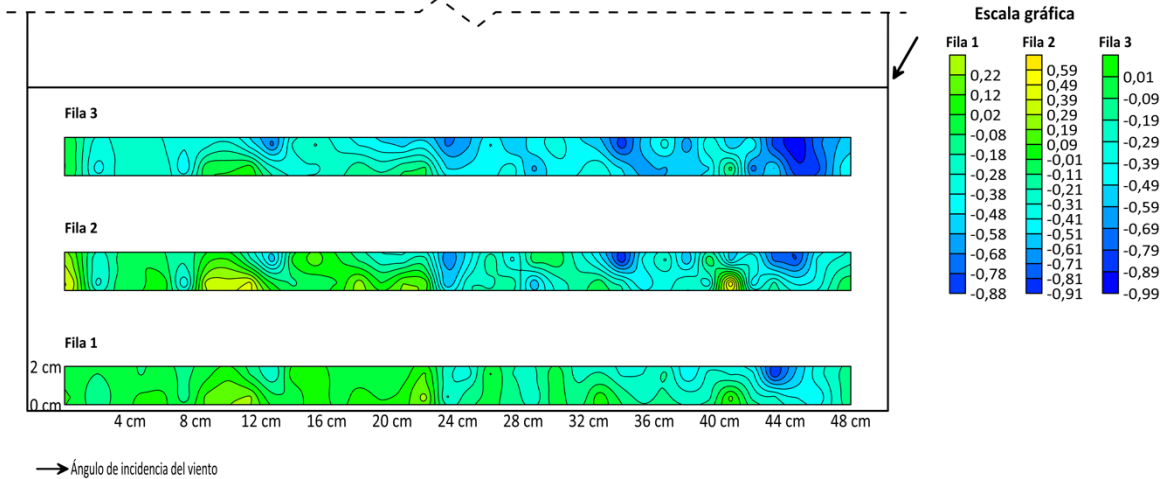
**$C_{pn,m}$  135 grados terreno categoría 4**



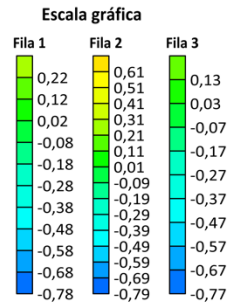
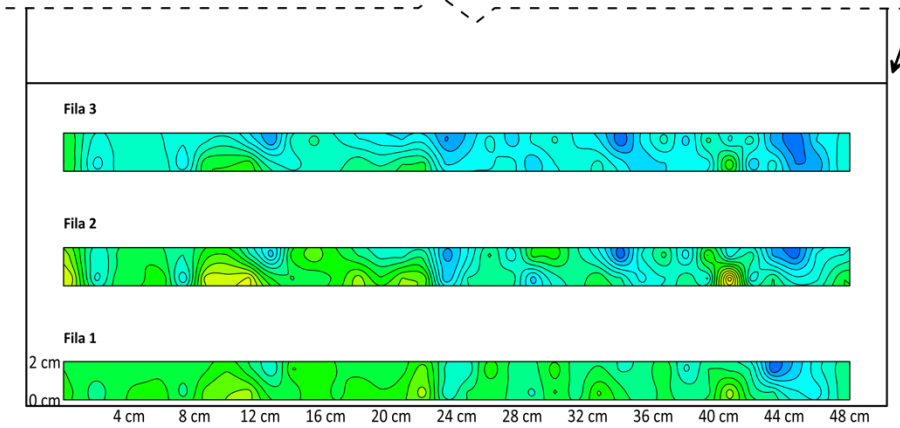
**$C_{pn,m}$  140 grados terreno categoría 4**



**$C_{pn,m}$  150 grados terreno categoría 4**

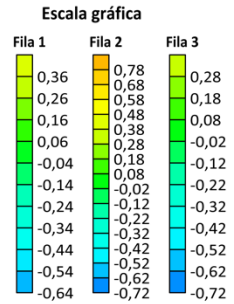
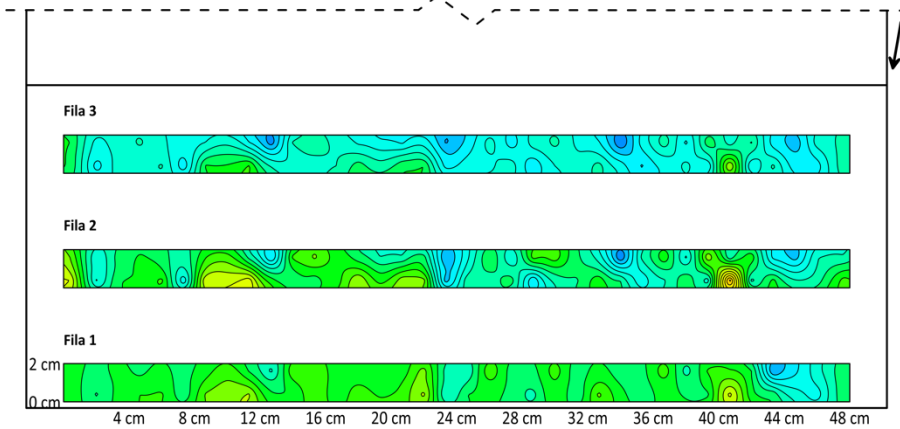


$C_{pn\_m}$  160 grados terreno categoría 4



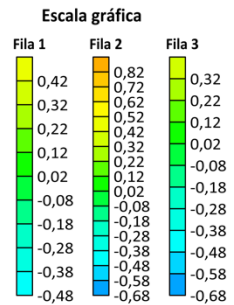
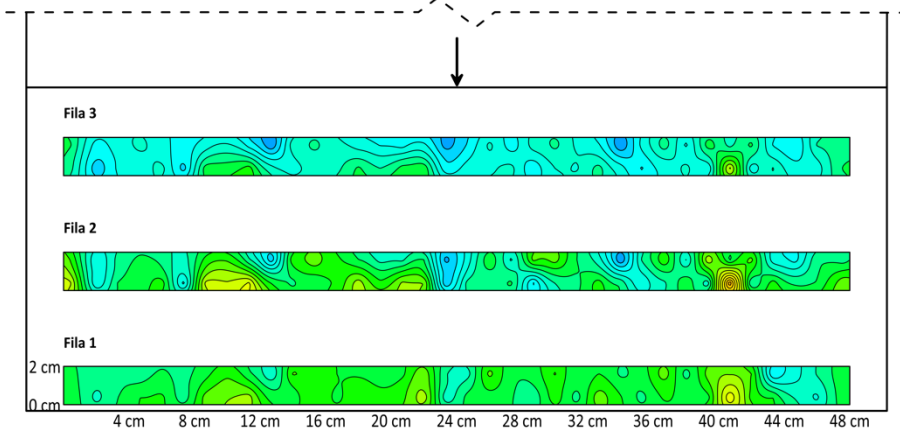
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_m}$  170 grados terreno categoría 4



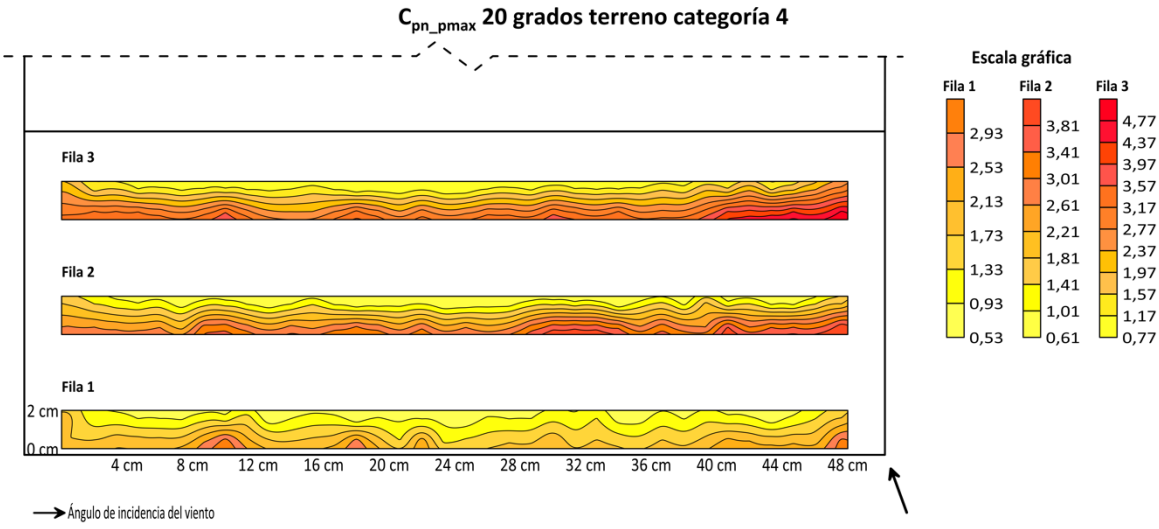
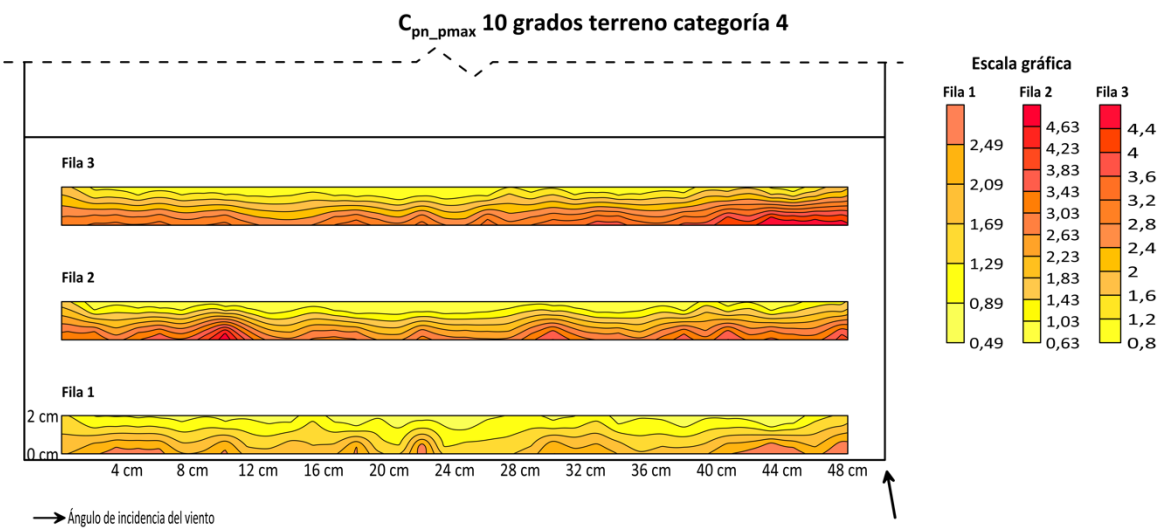
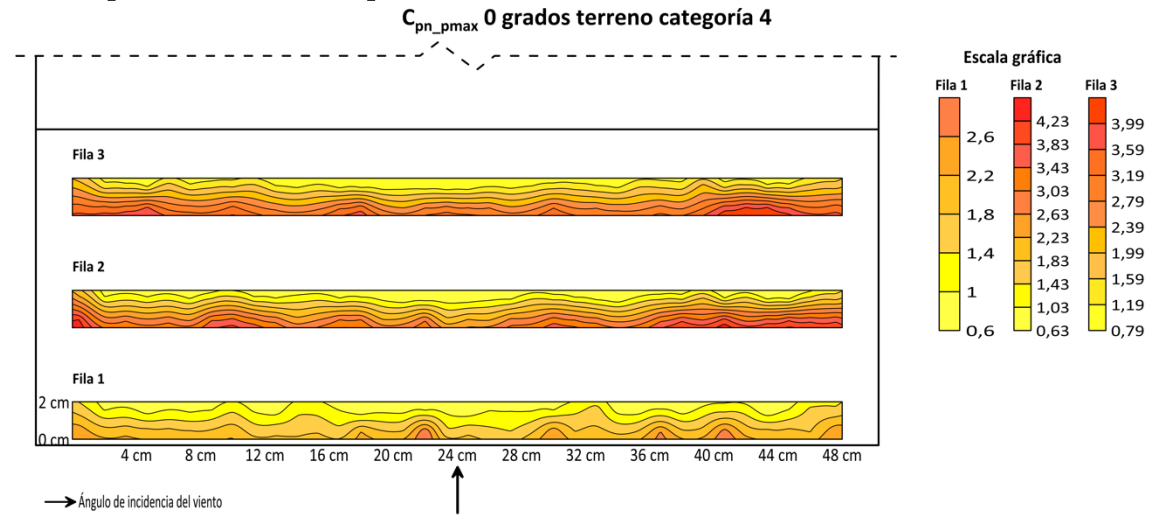
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_m}$  180 grados terreno categoría 4

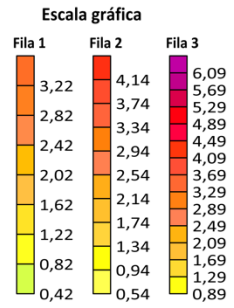
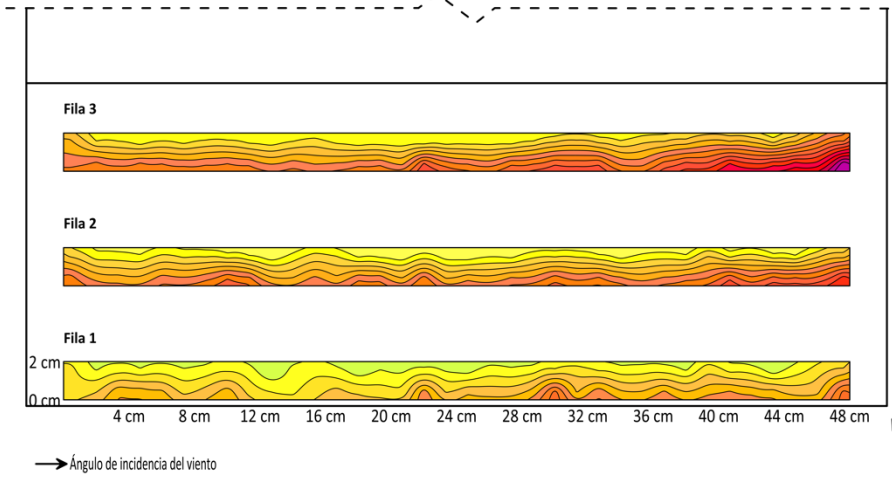


→ Ángulo de incidencia del viento

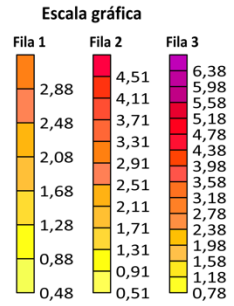
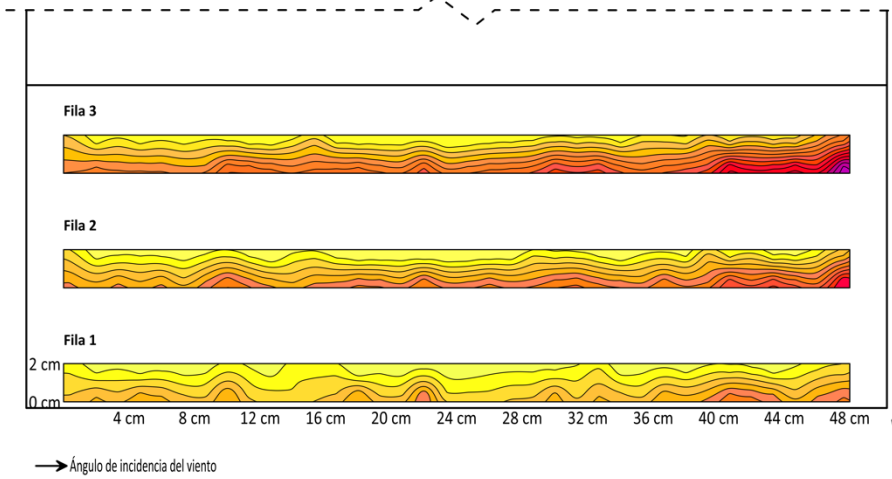
**Apéndice E. Mapas de coeficientes de presión neta, valores picos máximos ( $C_{pn\_pmax}$ ), terreno categoría 4 [elaboración propia]**



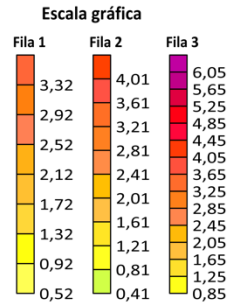
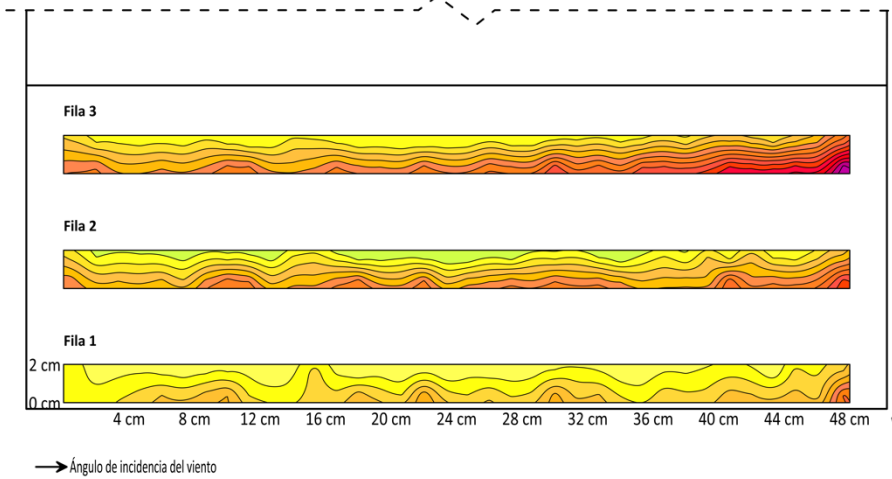
$C_{pn\_pmax}$  30 grados terreno categoría 4



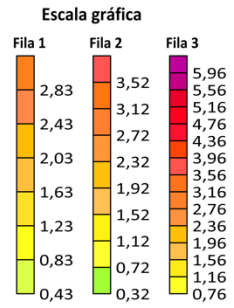
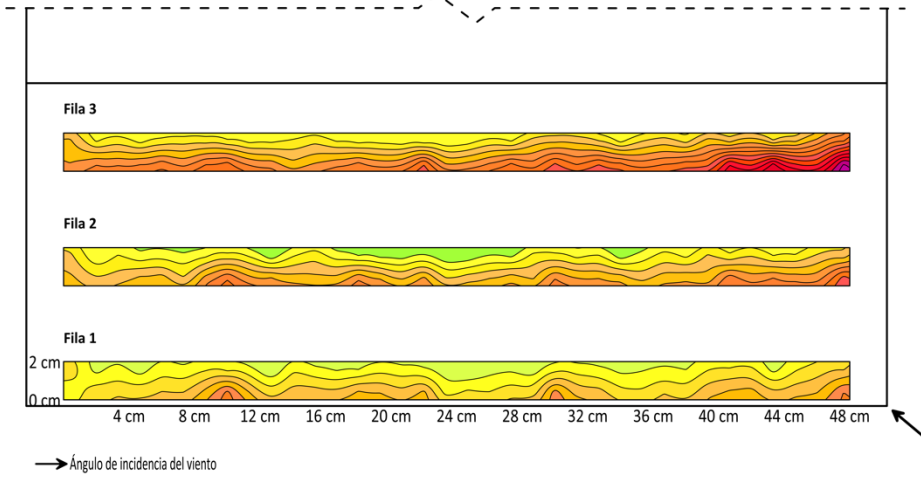
$C_{pn\_pmax}$  40 grados terreno categoría 4



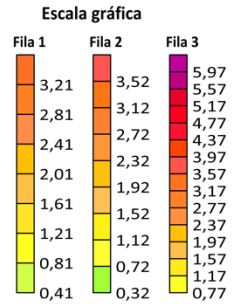
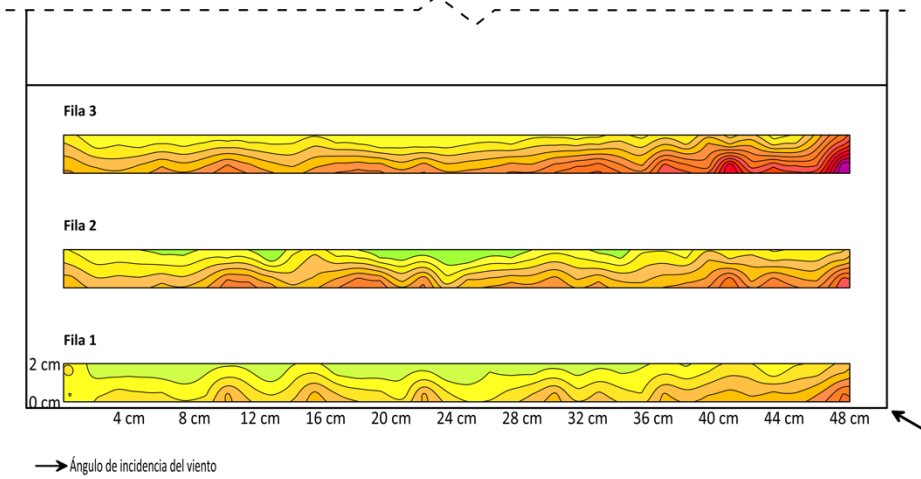
$C_{pn\_pmax}$  45 grados terreno categoría 4



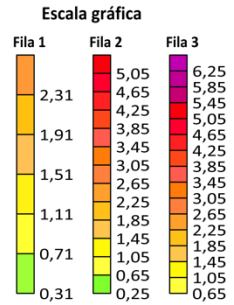
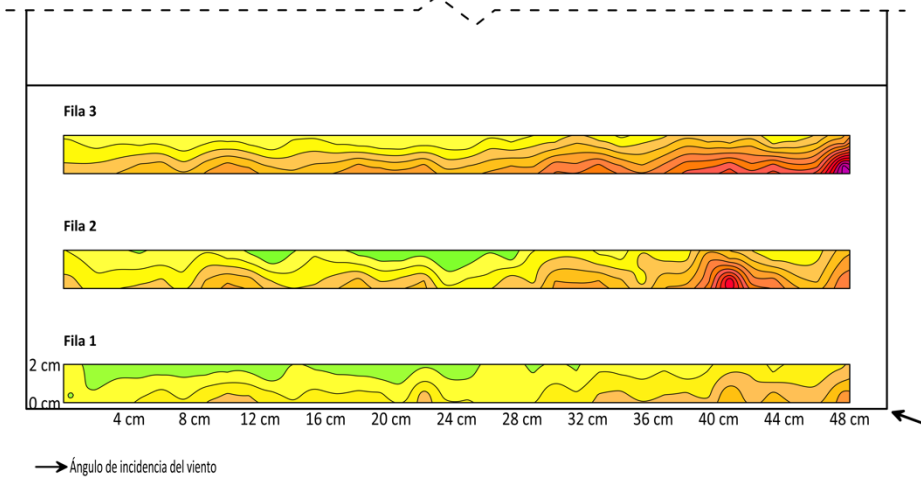
$C_{pn\_pmax}$  50 grados terreno categoría 4



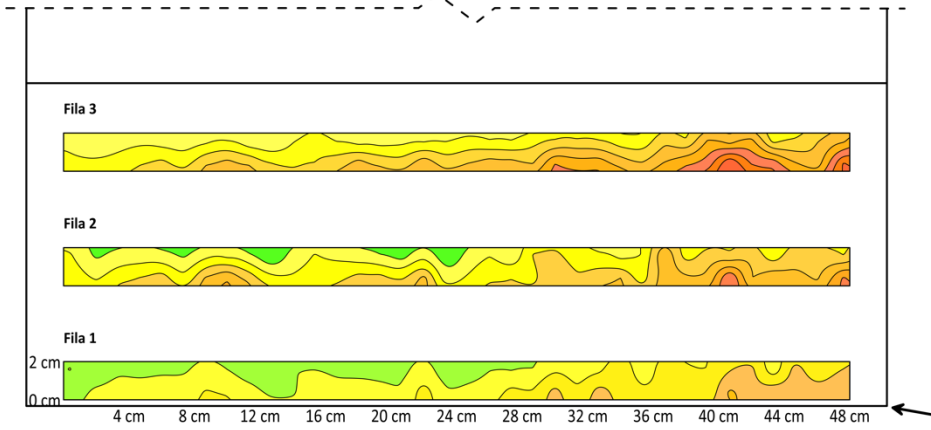
$C_{pn\_pmax}$  60 grados terreno categoría 4



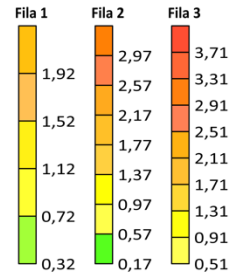
$C_{pn\_pmax}$  70 grados terreno categoría 4



$C_{pn\_pmax}$  80 grados terreno categoría 4

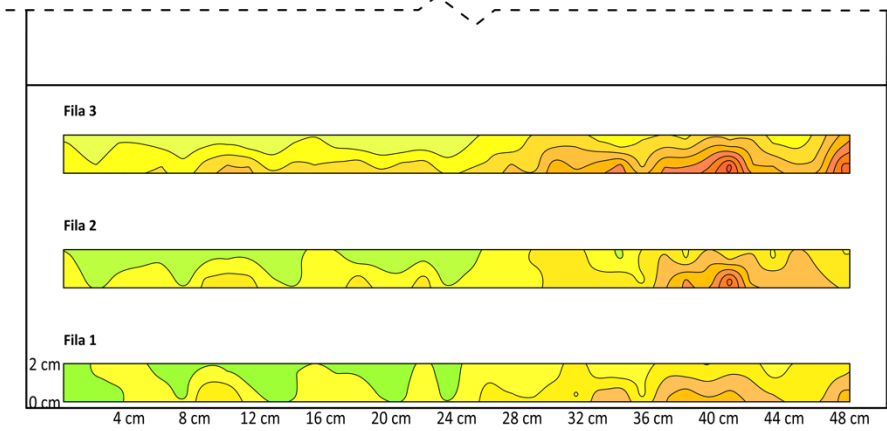


Escala gráfica

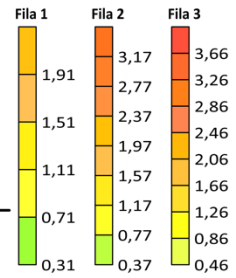


→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmax}$  90 grados terreno categoría 4

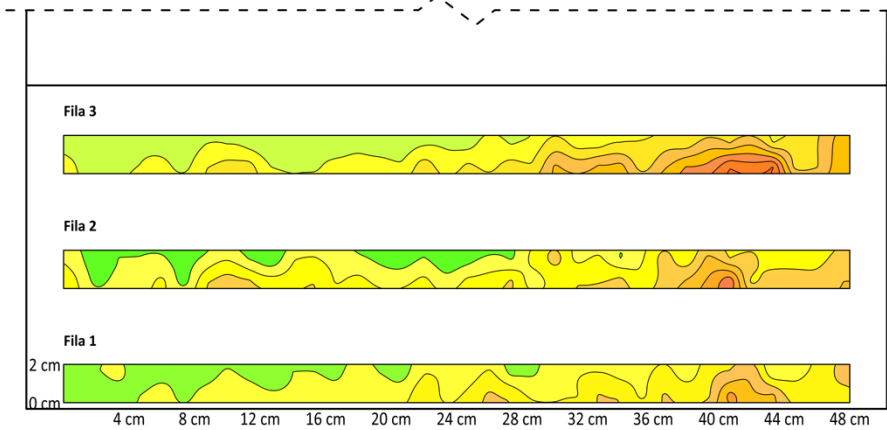


Escala gráfica

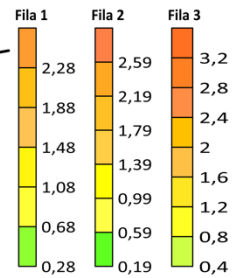


→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmax}$  100 grados terreno categoría 4



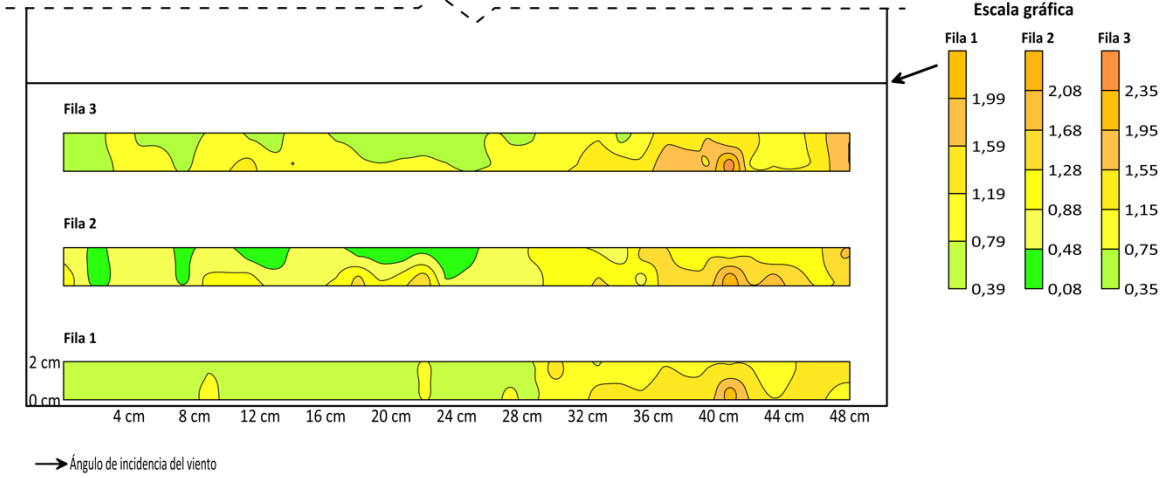
Escala gráfica



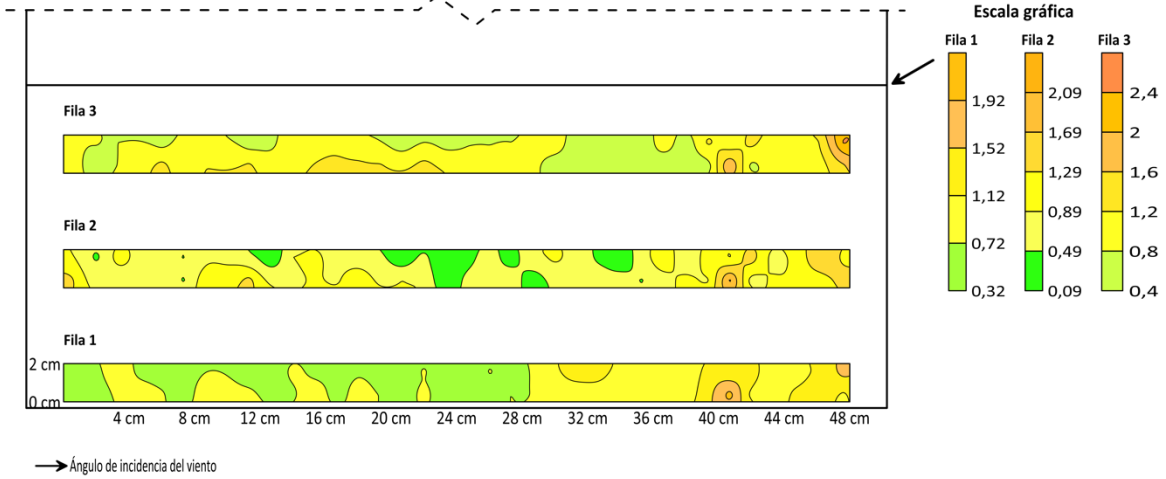
→ Ángulo de incidencia del viento



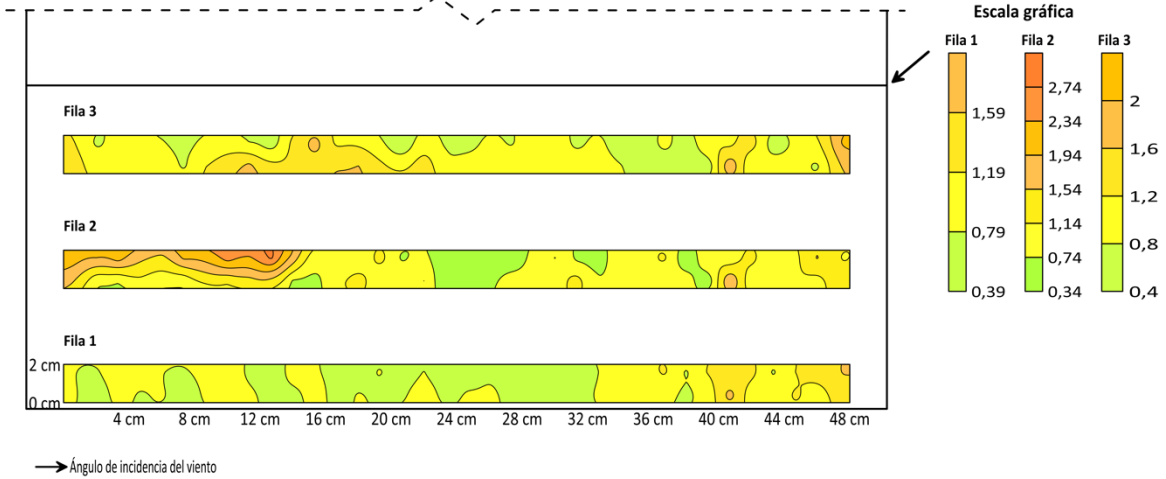
**$C_{pn\_pmax}$  110 grados terreno categoría 4**



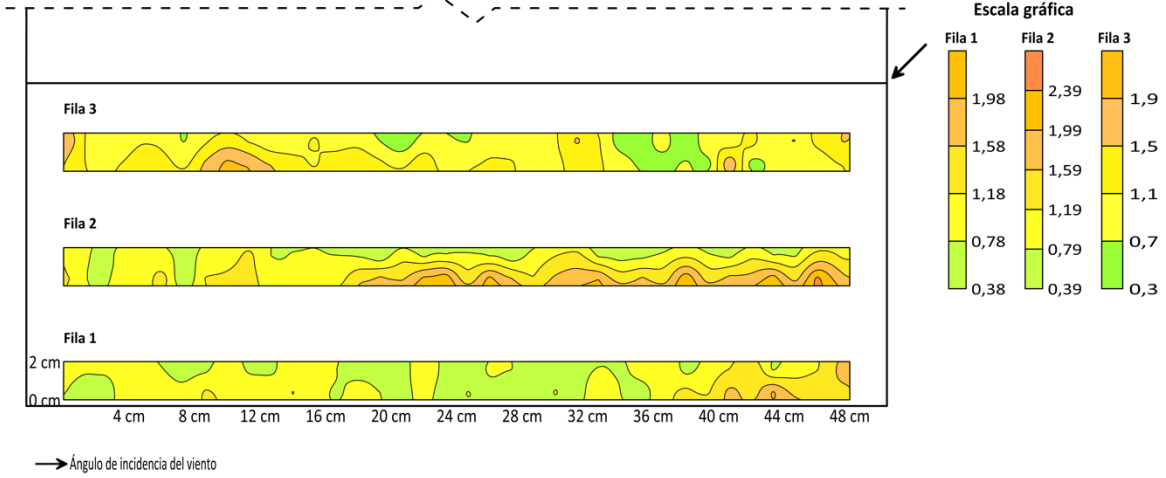
**$C_{pn\_pmax}$  120 grados terreno categoría 4**



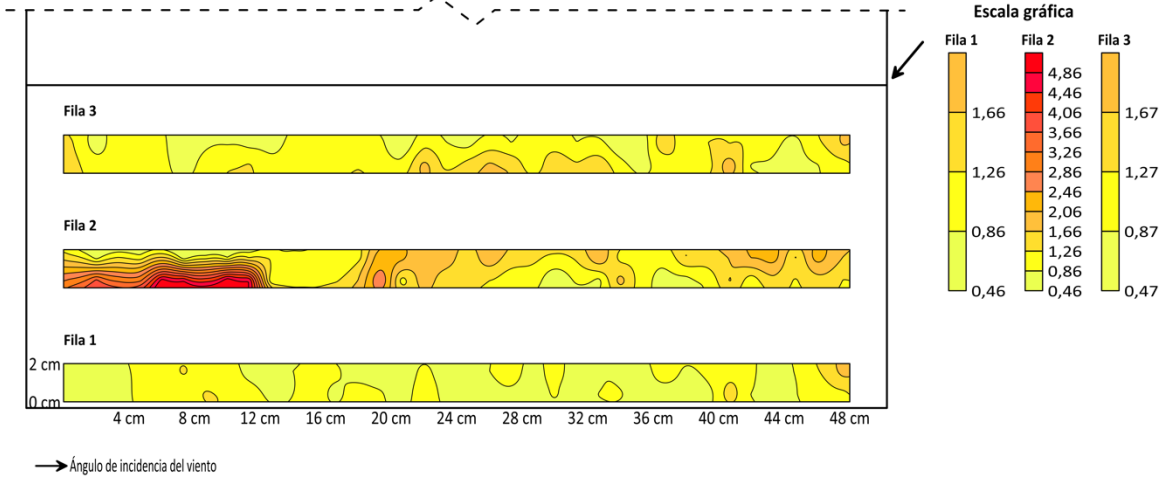
**$C_{pn\_pmax}$  130 grados terreno categoría 4**



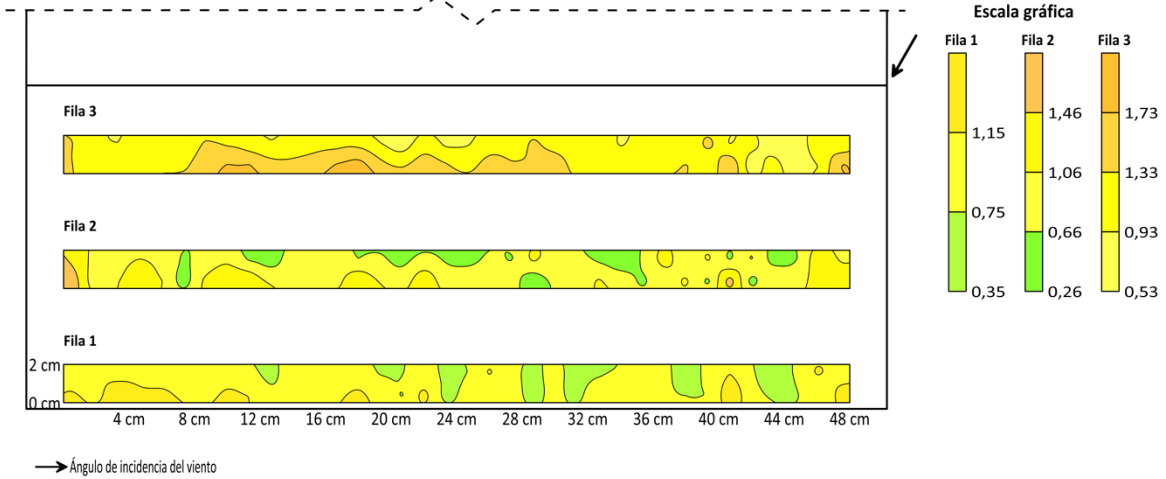
$C_{pn\_pmax}$  135 grados terreno categoría 4



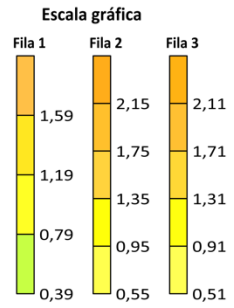
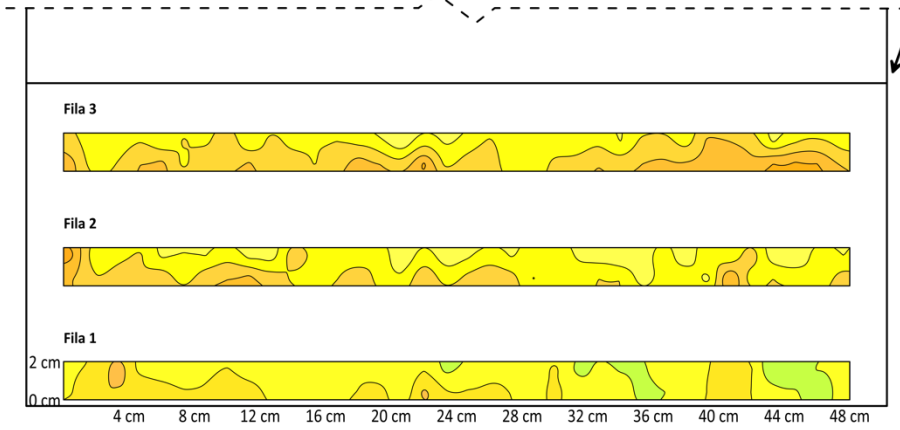
$C_{pn\_pmax}$  140 grados terreno categoría 4



$C_{pn\_pmax}$  150 grados terreno categoría 4

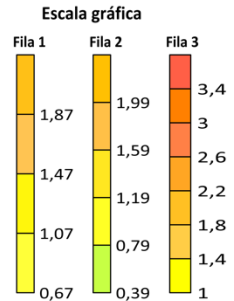
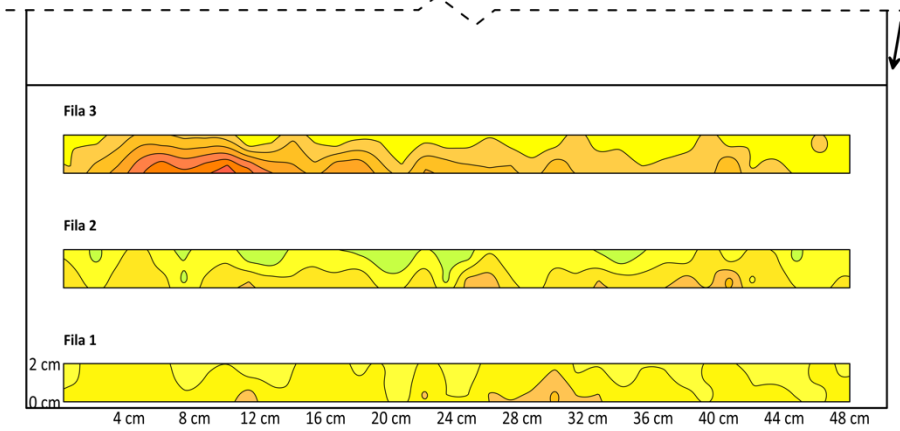


$C_{pn\_pmax}$  160 grados terreno categoría 4



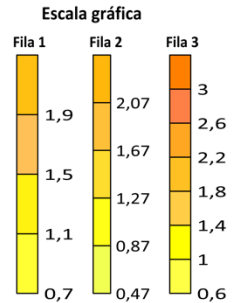
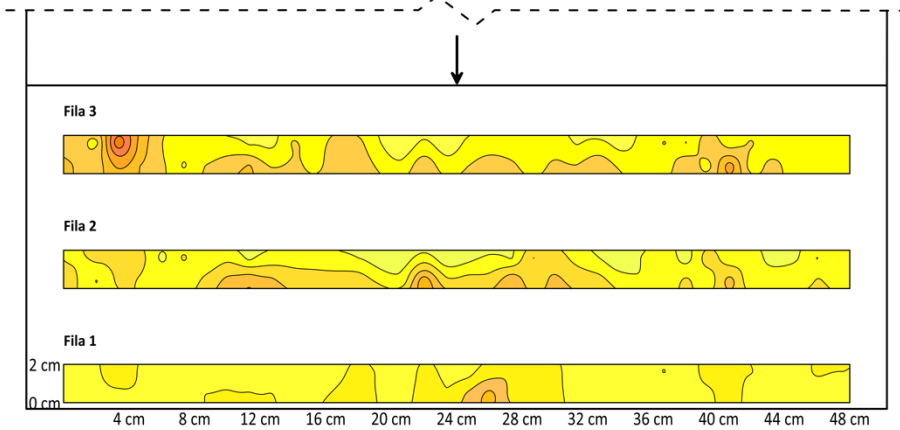
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmax}$  170 grados terreno categoría 4



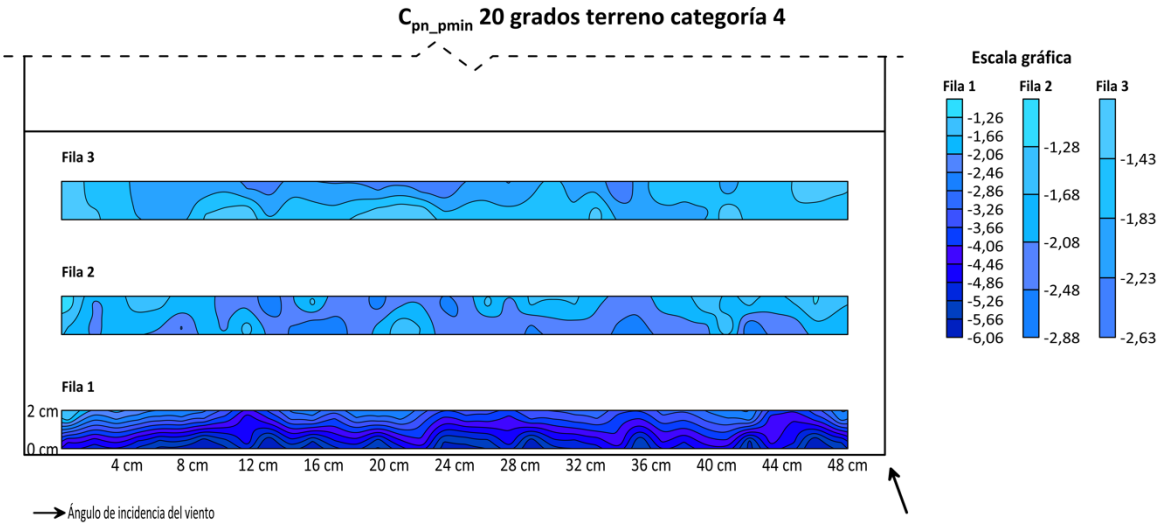
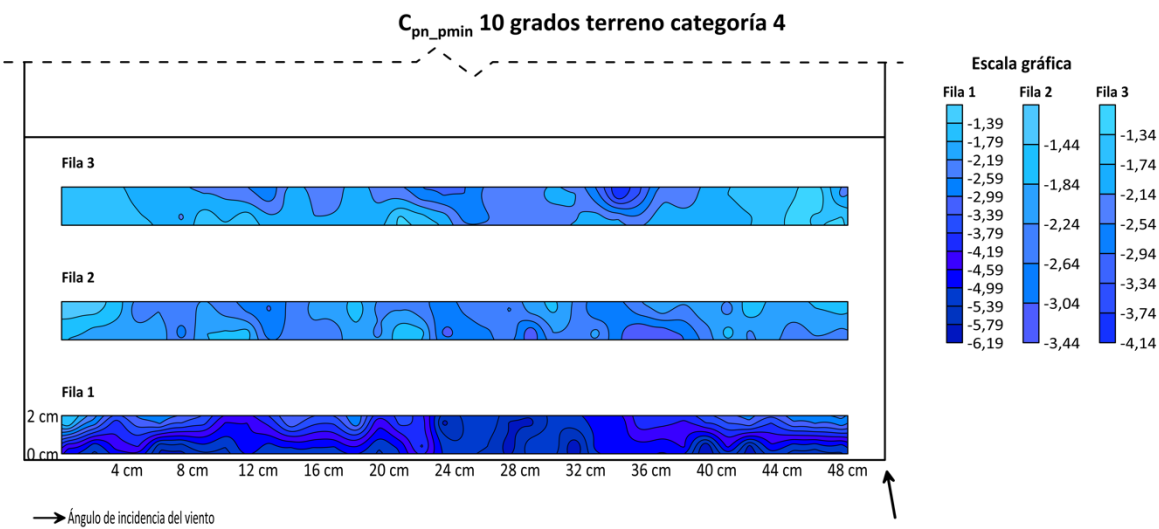
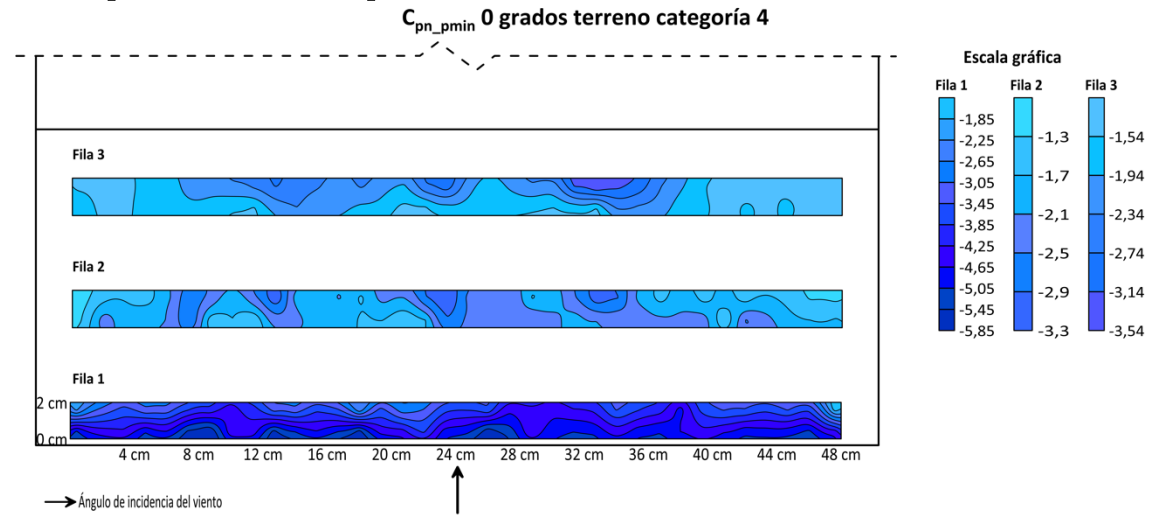
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmax}$  180 grados terreno categoría 4

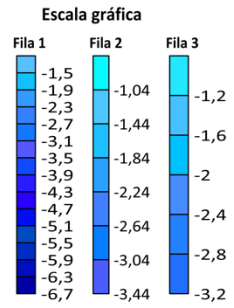
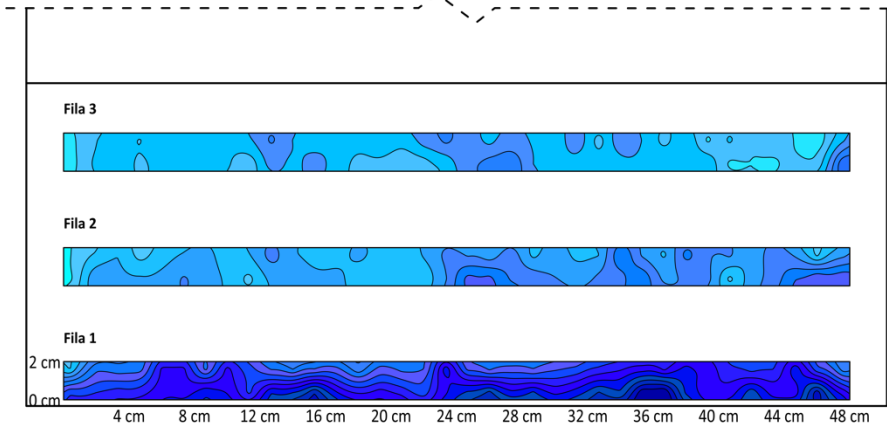


→ Ángulo de incidencia del viento

**Apéndice F. Mapas de coeficientes de presión neta, valores picos mínimos ( $C_{pn\_pmin}$ ), terreno categoría 4 [elaboración propia]**

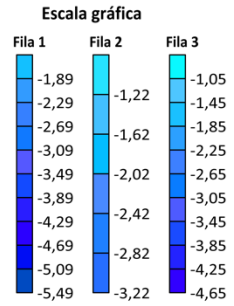
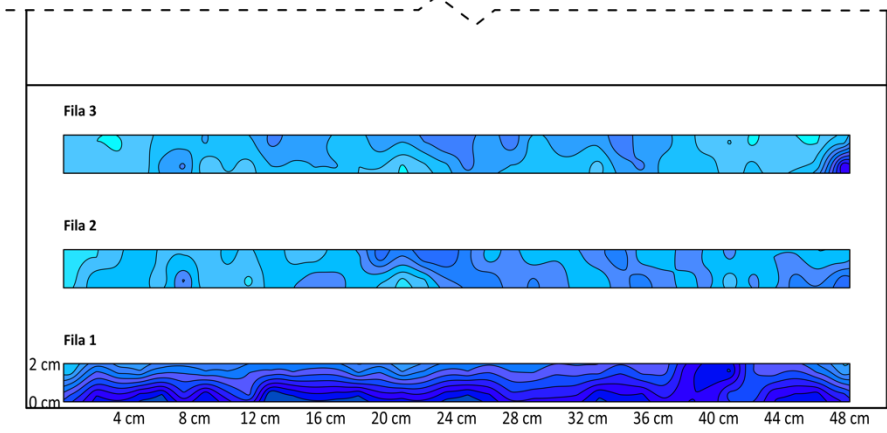


$C_{pn\_pmin}$  30 grados terreno categoría 4



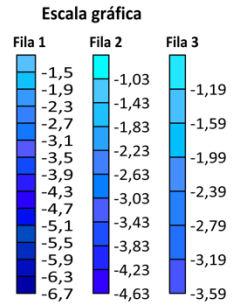
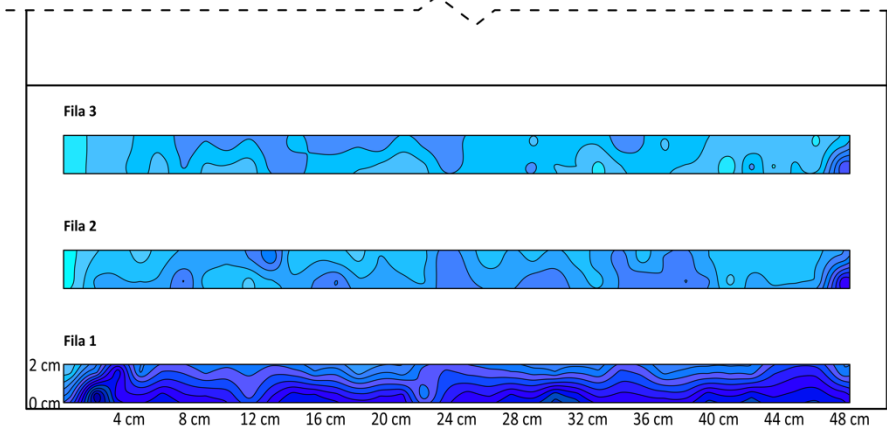
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  40 grados terreno categoría 4



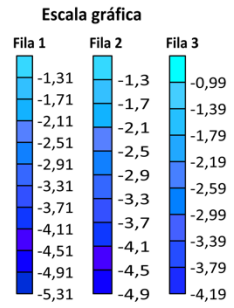
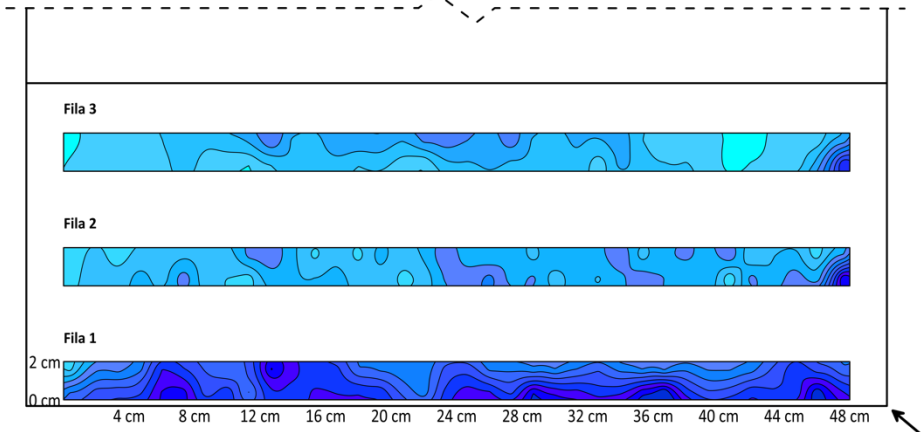
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  45 grados terreno categoría 4



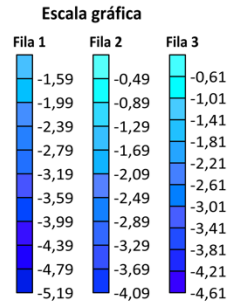
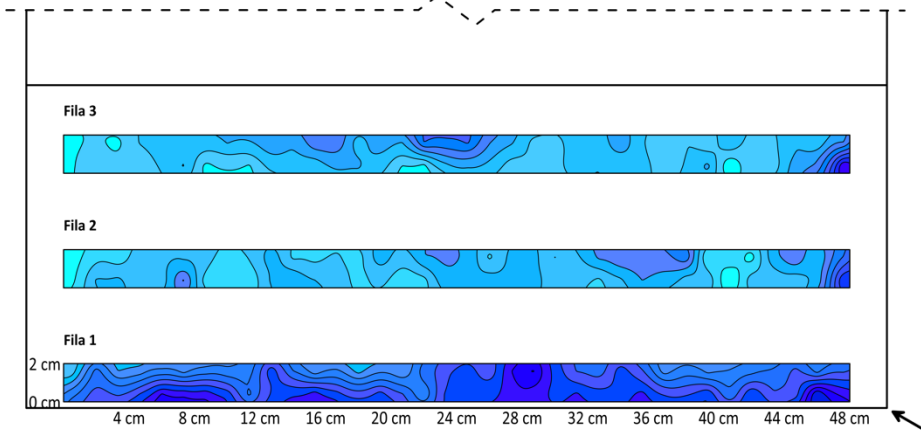
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  50 grados terreno categoría 4



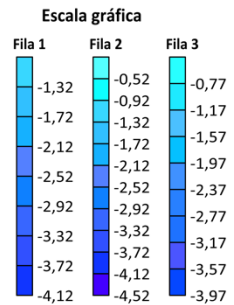
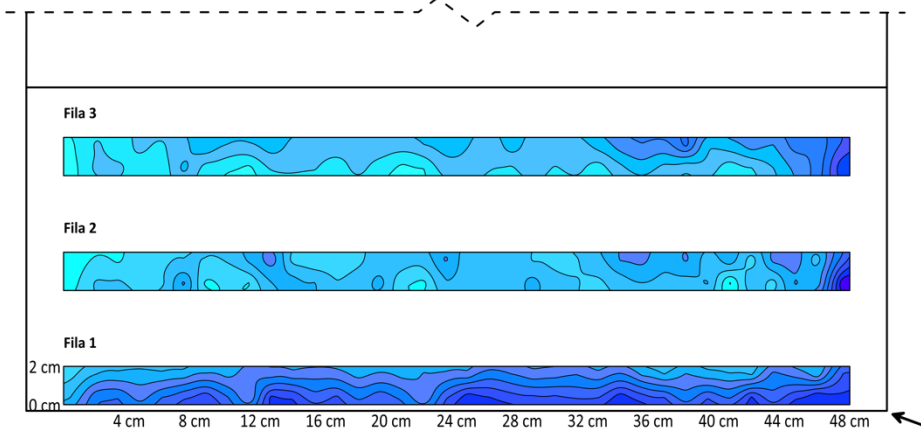
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  60 grados terreno categoría 4



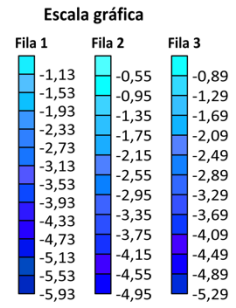
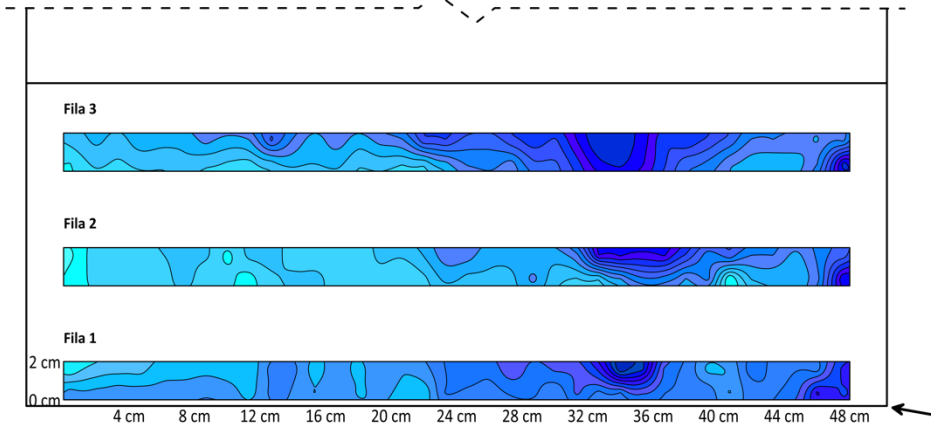
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  70 grados terreno categoría 4



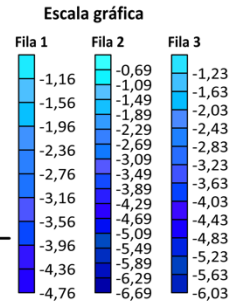
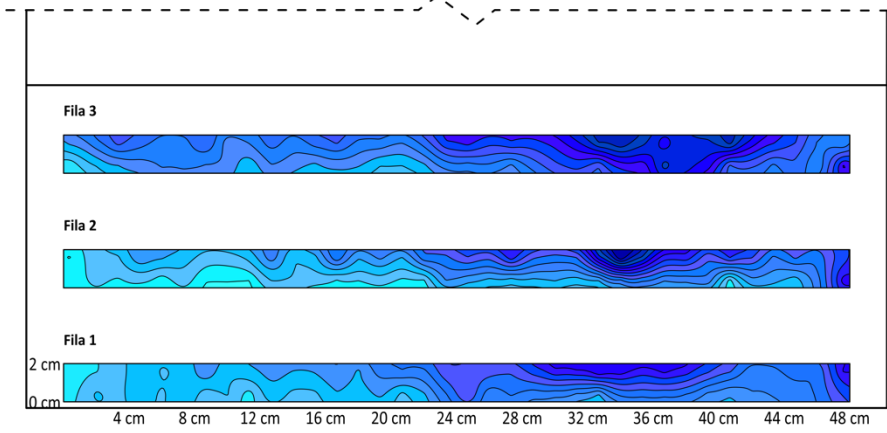
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  80 grados terreno categoría 4



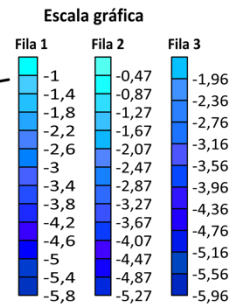
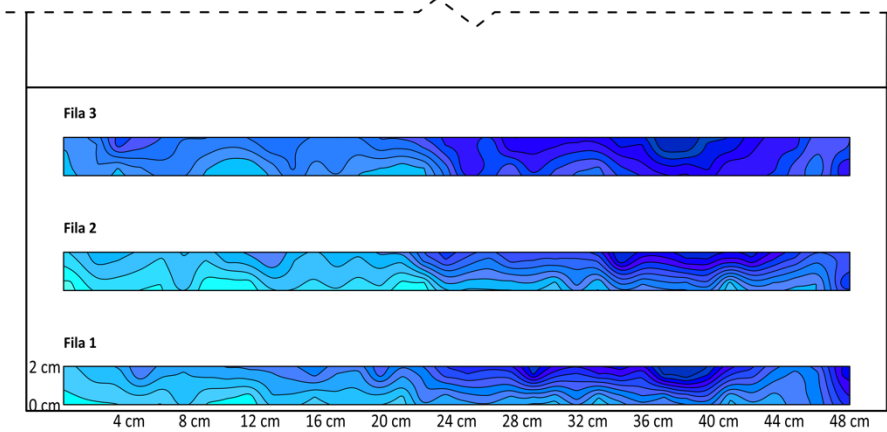
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  90 grados terreno categoría 4



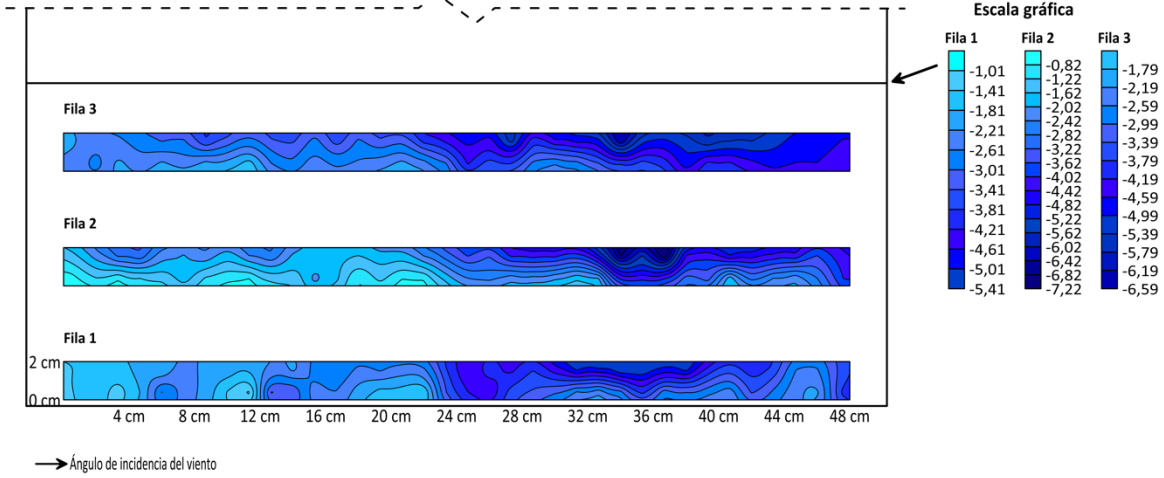
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  100 grados terreno categoría 4

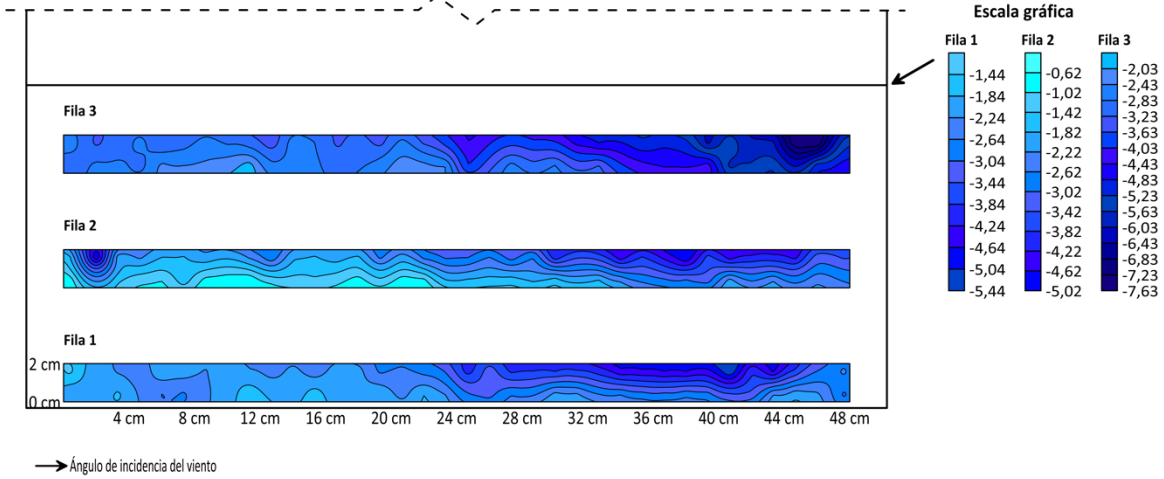


→ Ángulo de incidencia del viento

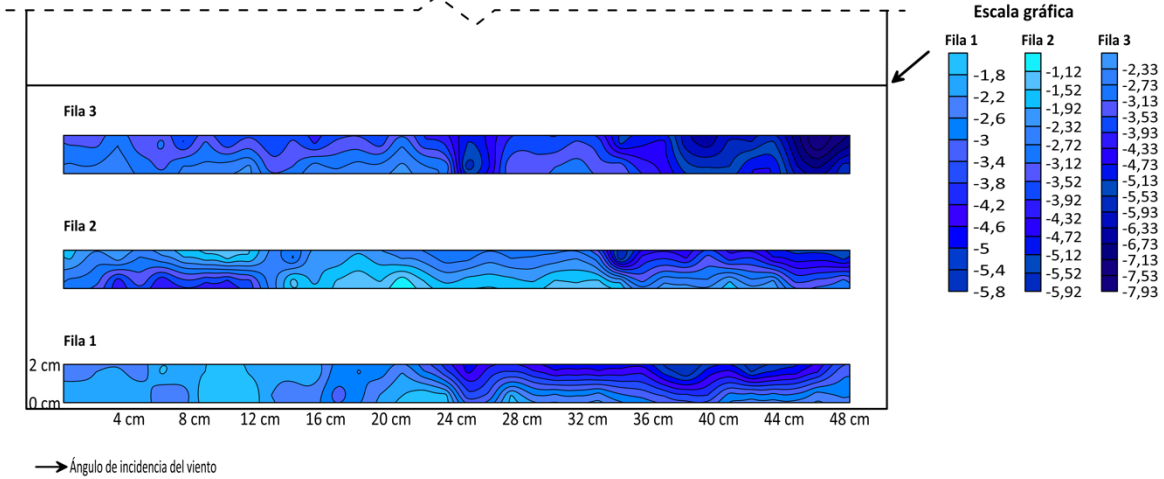
$C_{pn\_pmin}$  110 grados terreno categoría 4



$C_{pn\_pmin}$  120 grados terreno categoría 4

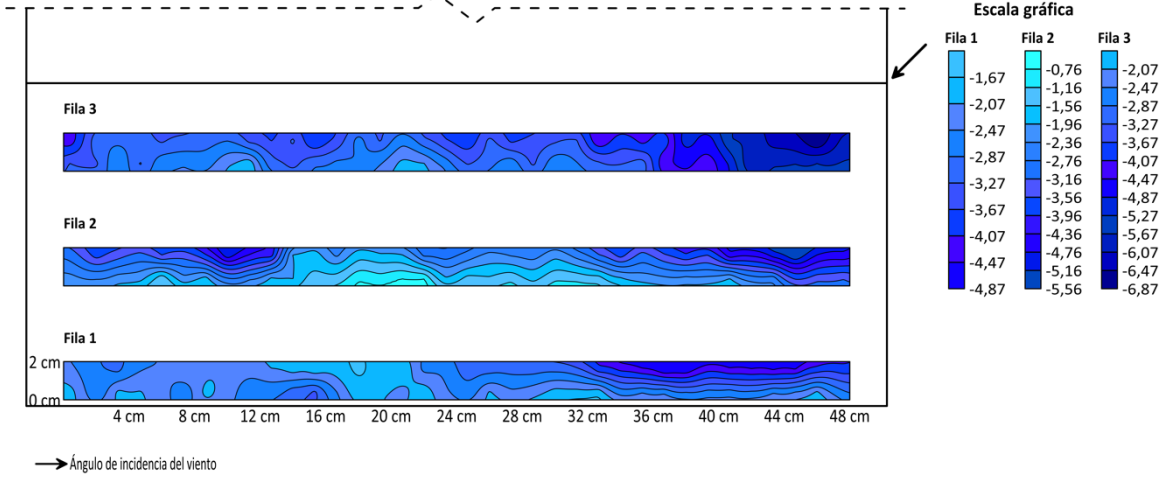


$C_{pn\_pmin}$  130 grados terreno categoría 4

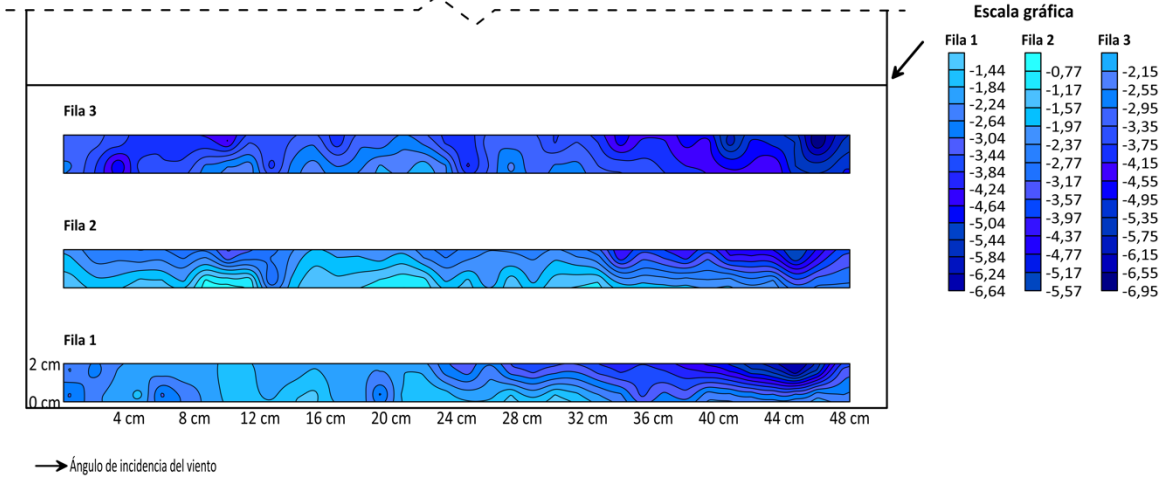




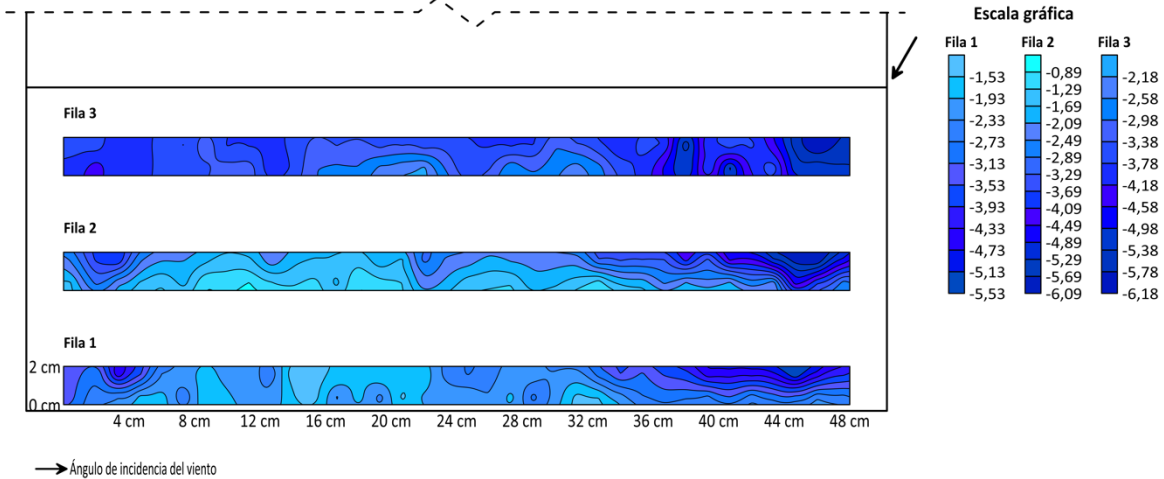
$C_{pn\_pmin}$  135 grados terreno categoría 4



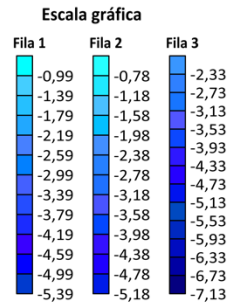
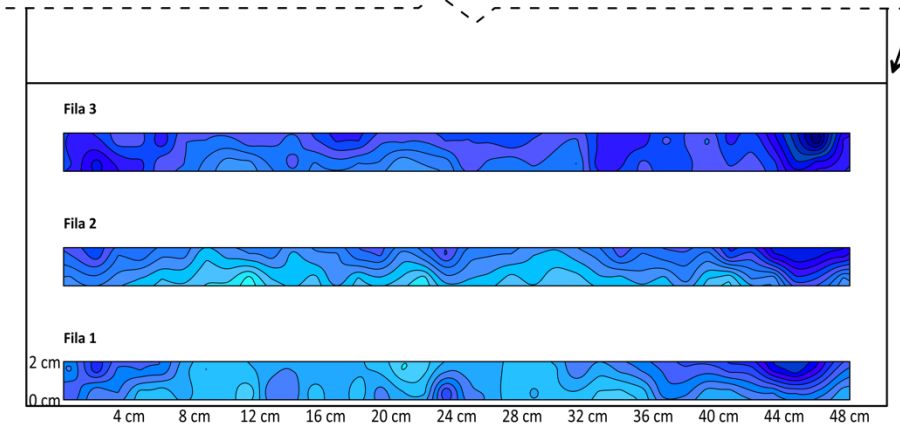
$C_{pn\_pmin}$  140 grados terreno categoría 4



$C_{pn\_pmin}$  150 grados terreno categoría 4

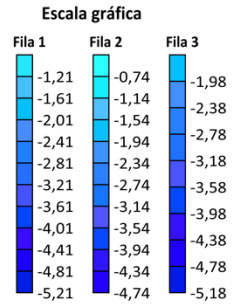
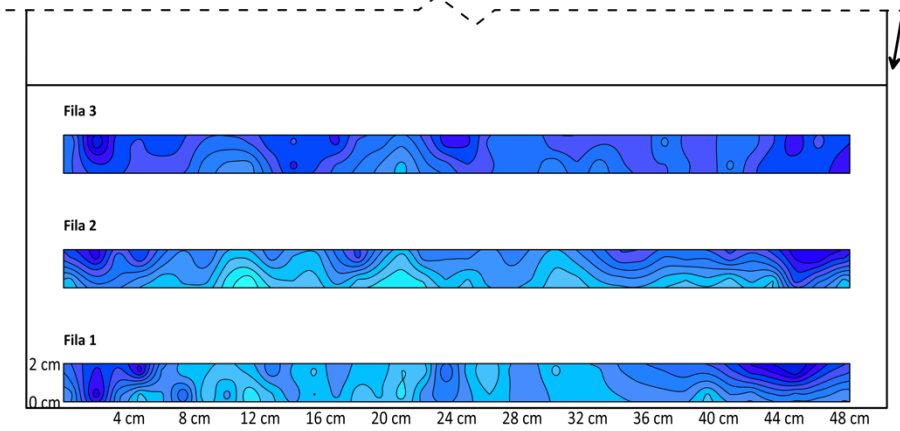


$C_{pn\_pmin}$  160 grados terreno categoría 4



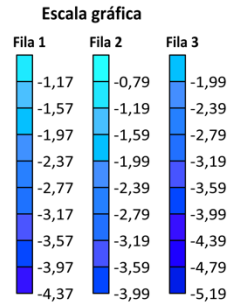
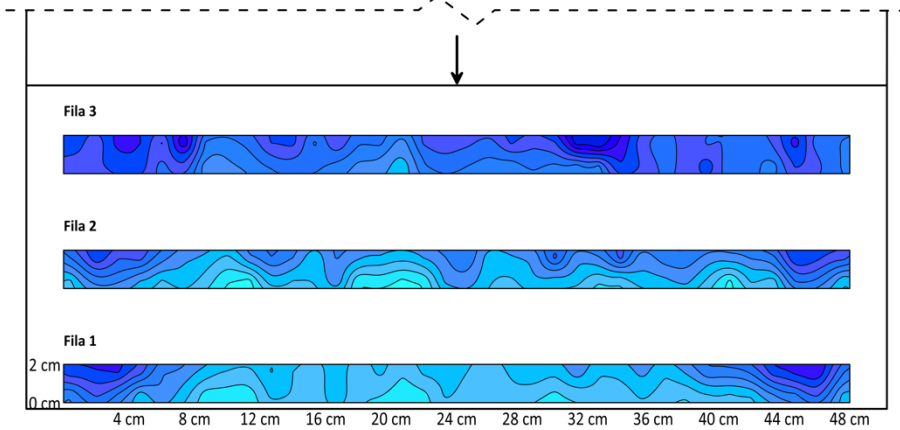
→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  170 grados terreno categoría 4



→ Ángulo de incidencia del viento

$C_{pn\_pmin}$  180 grados terreno categoría 4



→ Ángulo de incidencia del viento