



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

GENERACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS AGROVOLTAICOS  
BIFACIALES EN EL VALLE DE LLUTA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FRANCO VICENTE CLANDESTINO MUÑOZ

PROFESOR GUÍA:  
JOSÉ MIGUEL CARDEMIL IGLESIAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
TOMÁS ÁVILA ARAYA  
AQUILES SEPÚLVEDA OSSES

SANTIAGO DE CHILE  
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: FRANCO VICENTE CLANDESTINO MUÑOZ  
FECHA: MAYO 2020  
PROF. GUÍA: JOSÉ MIGUEL CARDEMIL  
IGLESIAS

## GENERACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS AGROVOLTAICOS BIFACIALES EN EL VALLE DE LLUTA

Las necesidades básicas, en particular las demandas de alimentos y energía eléctrica, asociadas a la gran cantidad de personas que habitan actualmente nuestro planeta, han puesto sobre la mesa la discusión referente a los usos prioritarios que deben ser asignados a las tierras disponibles. Bajo este contexto, surge el concepto de sistema agrovoltaico (APV), el cual combina actividades agrícolas y de generación eléctrica fotovoltaica de manera simultánea sobre un mismo terreno. Esta tecnología se encuentra actualmente ligada a un nivel de investigación y desarrollo, ya que sus impactos sobre las distintas componentes (cultivos y paneles FV) aún no son, del todo, definidas.

De tal modo, se propone la implementación de este sistema en el norte de nuestro país, como posible solución a las problemáticas locales identificadas en el valle de Lluta, núcleo agrícola de la región de Arica y Parinacota. Las potenciales ventajas asociadas a esta instalación son: 1) el aumento en la producción de ciertos productos agrícolas, 2) un importante ahorro de agua dado el carácter árido de la zona y 3) la disponibilidad de energía eléctrica para comunidades locales de condiciones precarias.

Este trabajo se centra en el impacto de esta instalación sobre el desempeño de la componente energética, compuesta por tecnología fotovoltaica bifacial, la cual aprovecha la cara posterior del panel para una producción energética adicional. Para cumplir con lo propuesto, dos localidades específicas del valle son seleccionadas: en las que son desarrollados los cultivos de berenjenas y cebollas. En adelante, se plantea determinar el impacto en la generación energética, asociado a la instalación de tecnología PV bifacial sobre los suelos agrícolas de cada locación seleccionada.

Para lo anterior, se diseña y aplica una metodología adecuada, capaz de estimar la reflexión generada –albedo- por los suelos agrícolas del valle de Lluta. Esta, toma valores experimentales medidos en sitio, comprueba y define su relación con los parámetros de radiación global horizontal (GHI), ángulo azimut y ángulo cenital, determina el efecto de su disposición espacial por medio del factor de visión y considera las consecuencias asociadas a la evolución de sus componentes en el tiempo.

El estudio arroja impactos interesantes para la componente energética. La metodología empleada revela entre un 11,42% y un 17,23% de ganancia energética frente al estándar monofacial. Lo anterior asociado a los cultivos cebollas y berenjenas respectivamente.

En memoria de Roberto Román Latorre,  
por ser fuente de conocimiento e inspiración.

## AGRADECIMIENTOS

De más está decir que aquel cabro chico ingenuo, que cruzaba por primera vez la terraza sobria camino a la G-305 en el inicio de aquel marzo de 2013, es totalmente diferente al que hoy, bajo cuarentena, intenta hacer memoria de todo lo vivido en esta linda y larga estadía en Beauchef. Fue dentro de estas murallas donde aprendí, fallé, celebré y sufrí.

Donde conocí la enorme satisfacción de conseguir algo producto del esfuerzo y la dedicación de días y -sobre todo- noches de estudio. Así como también, la lapidaria frustración de comprobar que no, que la pauta del auxiliar no tenía errores y que yo, junto a mi recientemente destruida sensación de grandeza, aún nos debíamos una larga noche de pauteo si es que queríamos evitar un rojazo al día siguiente.

Aquí disfruté de los mejores carretes universitarios, en los cuales me mandé mil y una cagadas. Participé por primera vez en marchas y manifestaciones, algunas con desenlaces desastrosos. Me enamoré de la cancha de 850, mi lugar favorito de la facultad, donde pude jugar con los Mamarres y los Nicopetiados, e incluso ser campeón con Mecánica y con Puyols, mi equipo de siempre. Formé parte de un grupo increíble enfocado en la integración de los estudiantes extranjeros bajo el arte del carrete. Estuve a punto de tirar la toalla en 4to año y viví la intensa experiencia de algo más que un intercambio en la USP de Brasil. Entre muchas otras cosas.

Pero principalmente, Beauchef fue el lugar donde hice amistades increíbles que espero conservar de por vida, y a las que agradezco por hacer de mi etapa universitaria un recuerdo motivo de mil sonrisas.

A mis pumahuinos: Martín, Francis y Fefi.

A mis amigos de sección: Mono, Bragui, Mame, Rojas, Chamoya, Puyol, Labro, Margi y Oni.

A la familia mecánica, en especial a la Paskiwawi, Carlitos y Chopan.

A mis amigos mecánicos post-intercambio, en especial al Loco Yévenes y al Doña (ahyia).

Y a los que tuve la fortuna de conocer a lo largo de este camino, particularmente a Juanpito, Luli, Chino, Gomi, TNI, Alvin, Pieré, Freddy y Guiraldios.

Quiero agradecer también a mis profesores: a Tomacito por comprometerse de verdad con este trabajo y por siempre guiarme como un amigo. Al profesor José Miguel, por aceptar el desafío de tomar un trabajo en la mitad y ayudarme a cerrarlo de la mejor manera. Y a mi Tatamán, por aportar con el punto de vista crítico y exigente de un escritor.

Mención aparte merece mi familia, quienes han estado siempre y me han permitido convertirme en el ingeniero desempleado que hoy soy. Gracias a mi mamá por enseñarme lo que es el cariño, a mi papá por siempre apoyarme y aconsejarme, al Coke por dejarme claro lo que significa la incondicionalidad y a mi Ita por llevarme de la mano desde siempre.

## TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1. Objetivos .....	3
1.1.1. Objetivo general.....	3
1.1.2. Objetivos específicos .....	3
1.2. Alcances y metodología .....	4
Capítulo 2: Sistemas agrovoltaicos .....	7
2.1. Concepto APV .....	7
2.2. El componente fotovoltaico.....	9
2.3. La componente agrícola .....	10
2.4. Casos documentados .....	14
2.5. El caso en climas áridos.....	15
Capítulo 3: Tecnología bifacial PV .....	16
3.1 Principales parámetros y variables .....	16
3.1 Las Tecnologías .....	22
Capítulo 4: Valle de Lluta.....	26
4.1. Contextualización .....	26
4.2. Levantamiento de información – visita al Valle de Lluta .....	28
4.2.1. Características sector agrícola .....	29
4.2.2. Problemáticas .....	29
Capítulo 5: Estimación del albedo .....	31
5.1. Etapa 1: Selección de suelos representativos .....	31
5.1.1. Cultivo de cebollas.....	31
5.1.2. Cultivo de berenjenas .....	33

5.1.3. Definición de suelos representativos .....	35
5.2. Etapa 2: Albedo generado por cada componente .....	36
5.2.1. Medición de albedo.....	37
5.2.2. Modelo estimador de radiación reflejada .....	47
5.3. Etapa 3: Estudio de la disposición espacial sobre configuraciones simplificadas .....	55
5.3.1. El factor de visión .....	56
5.3.2. Aplicación .....	57
5.3.3. Resultados .....	59
5.4. Etapa 4: Obtención albedo local.....	64
Capítulo 6: Simulación .....	74
6.1. Configuración .....	74
6.1.1. Equipos.....	74
6.1.2. Pérdidas .....	75
6.2. Resultados.....	76
6.2.1. Radiación disponible en el panel FV .....	76
6.2.2. Generación de corriente directa (DC).....	79
6.2.3. Generación corriente alterna (AC).....	83
Capítulo 7: Conclusiones.....	84
7.1. Trabajo futuro.....	86
7.1.1. Consideración n°1: .....	86
7.1.2. Consideración n°2:.....	86
7.1.3. Consideración n°3:.....	86
7.1.4. Consideración n°4: .....	87
7.1.5. Consideración n°5:.....	87
7.1.6. Consideración n°6: .....	87

Bibliografía .....	88
ANEXOS .....	93
7.2. Plásticultura.....	93
7.3. Transformación a tiempo solar .....	95
7.4. Norma de Riverside .....	97
7.5. Fichas técnicas (datasheets) .....	98
7.5.1. Piranómetro CMP10 Kipp&Zonen.....	98
7.5.2. Plástico agrícola Polietileno blanco laminado lechoso anti UV.....	99
7.6. Pérdidas montaje simulado .....	100

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1. COMPARATIVA ENTRE VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS AGROFOTOVOLTAICOS. ....	12
TABLA 2. ALBEDO EFECTIVO PARA DISTINTAS SUPERFICIES [38] .....	20
TABLA 3. PRINCIPALES TECNOLOGÍAS BIFACIALES PV Y SUS CARACTERÍSTICAS [23] .....	25
TABLA 4. PARÁMETROS Y CONCENTRACIONES DEL AGUA PROVENIENTE DEL RÍO LLUTA [47]. ....	27
TABLA 5. DATOS AGRICULTORES ENTREVISTADOS.....	30
TABLA 6. RESULTADOS NIVEL DE IMPACTO DE PROBLEMÁTICAS SEGÚN AGRICULTORES LOCALES. ....	30
TABLA 7. CALENDARIO ANUAL SIMPLIFICADO CULTIVO DE CEBOLLAS. ....	33
TABLA 8. CALENDARIO ANUAL SIMPLIFICADO CULTIVO DE BERENJENAS.....	34
TABLA 9. RESUMEN PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS CULTIVOS CEBOLLA Y BERENJENA. ....	35
TABLA 10. DATOS GENERALES PLÁSTICO AGRÍCOLA. ....	39
TABLA 11. EQUIPOS Y MATERIALES PARA EL MONTAJE. ....	39
TABLA 12. COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN PARA EL MODELO DEL PLÁSTICO AGRÍCOLA. ....	51
TABLA 13. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PARA EL MODELO DE TIERRA. ....	52
TABLA 14: COEFICIENTES PARA POLINOMIOS DE ESTIMACIÓN DE ALBEDO. ....	52
TABLA 15. COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN PARA LOS DATOS DE VALIDACIÓN.....	55
TABLA 16. FACTORES DE VISIÓN OBTENIDOS PARA EL CASO DE CEBOLLAS.....	61
TABLA 17. FACTORES DE VISIÓN OBTENIDOS PARA EL CASO DE BERENJENAS. ....	63
TABLA 18. DEFINICIÓN DE CASOS ESTUDIADOS. ....	64
TABLA 19. FACTORES DE VISIÓN ANUALES PARA CEBOLLAS.....	68
TABLA 20. FACTORES DE VISIÓN ANUALES PARA BERENJENAS. ....	68
TABLA 21. CARACTERÍSTICAS DEL PANEL SELECCIONADO. ....	74
TABLA 22. CARACTERÍSTICAS DEL INVERSOR SELECCIONADO.....	75
TABLA 23. PÉRDIDAS EN GENERACIÓN DE ENERGÍA .....	75
TABLA 24. ENERGÍA QUE ALCANZA EL PLANO DE ARREGLO Y GANANCIA BIFACIAL DE RADIACIÓN MENSUAL PARA SUPERFICIE DE BERENJENAS. .....	76
TABLA 25. ENERGÍA QUE ALCANZA EL PLANO DE ARREGLO Y GANANCIA BIFACIAL DE RADIACIÓN MENSUAL PARA SUPERFICIE DE CEBOLLAS. ....	77
TABLA 26. ENERGÍA DE RADIACIÓN EXTRA DISPONIBLE PARA CONFIGURACIÓN BIFACIAL.....	77
TABLA 27. ENERGÍA ELÉCTRICA PRODUCIDA POR LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES PARA EL PANEL FV DE ESTUDIO. ....	82
TABLA 28. ENERGÍA ELÉCTRICA PRODUCIDA POR LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES PARA EL PANEL FV DE MAYOR BIFACIALIDAD. ....	82
TABLA 29. ENERGÍA AC ANUAL Y RENDIMIENTO OBTENIDOS. ....	83
TABLA 30. FACTOR DE CAPACIDAD Y PERFORMANCE RATIO OBTENIDOS. ....	83

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: CORRELACIÓN ENTRE POBLACIÓN Y CONSUMO DE ENERGÍA EN SUECIA, INGLATERRA Y GALES, ESTADOS UNIDOS Y EL MUNDO [2].	1
FIGURA 2. INCREMENTO DE LA CAPACIDAD INSTALADA EN EL MUNDO PROYECTADA PARA EL 2040 POR FUENTE DE ENERGÍA [3].	2
FIGURA 3. DIAGRAMA DE FLUJO METODOLOGÍA.	6
FIGURA 4. INVERNADERO APV.	7
FIGURA 5. PROYECTO JIANGSU, TRINASOLAR.	7
FIGURA 6. PLANTA VIRGILIO, AGROVOLTAICO, EN ITALIA.	7
FIGURA 7. PILOTO AGRO PV FRAUNHOFER EN LAMPA.	7
FIGURA 8. USO EFICIENTE DEL SUELO. CASO FRAUNHOFER.	8
FIGURA 9. POTENCIAL PARA INSTALACIÓN DE TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS SOBRE DISTINTOS SUELOS.	10
FIGURA 10. RADIACIÓN ALCANZADA A NIVEL DEL SUELO VS ALTURA INSTALACIÓN PANELES [4].	10
FIGURA 11. INSTALACIÓN AGROFOTOVOLTAICA VERTICAL.	11
FIGURA 12. DESEMPEÑO PANELES CASO AGROFOTOVOLTAICO VERTICAL.	12
FIGURA 13. IMPACTO DE LA INSTALACIÓN DE PANELES SOBRE DISTINTOS CULTIVOS SEGÚN FRAUNHOFER ISE [19].	14
FIGURA 14. ESQUEMA DIFERENCIAS TECNOLOGÍA BIFACIAL (IZQ.) Y MONOFACIAL (DER.).	16
FIGURA 15. EFECTO DEL ALBEDO SOBRE BGE (COLUMNA IZQ.) Y EFECTO DE ALTURA DE INSTALACIÓN SOBRE BGE (COLUMNA DER.)	18
FIGURA 16. ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN PARA CASO MONO Y BIFACIAL.	20
FIGURA 17. RELACIÓN ENTRE ALBEDO Y RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL (GHI) [39].	21
FIGURA 18. ALBEDO EFECTIVO Y ESPECTRAL PARA DISTINTAS SUPERFICIES.	22
FIGURA 19. PREDICCIÓN PARTICIPACIÓN CELDAS BIFACIALES EN EL MERCADO PV POR ITRPV [41].	22
FIGURA 20. ESQUEMA CELDA PERC	23
FIGURA 21. ESQUEMA CELDA PERC	24
FIGURA 22. ESQUEMA CELDA PERT.	24
FIGURA 23. ESQUEMA CELDA IBC	24
FIGURA 24. ESQUEMA CELDA HIT	25
FIGURA 25. VISTA SATELITAL VALLE DE LLUTA.	26
FIGURA 26. VISITA A TERRENO Y REALIZACIÓN DE ENCUESTAS A AGRICULTORES LOCALES.	28
FIGURA 27. CULTIVOS IDENTIFICADOS EN LA VISITA A TERRENO. ARRIBA: BERENJENA (IZQ.) Y CEBOLLA (DER.). ABAJO: MAÍZ LLUTEÑO (IZQ.) Y ALFALFA (DER.).	29
FIGURA 28. CULTIVOS DE CEBOLLA EN EL VALLE DE LLUTA.	32
FIGURA 29. CULTIVOS DE BERENJENAS EN EL VALLE DE LLUTA.	34
FIGURA 30. SUPERFICIE REPRESENTATIVA DE CEBOLLAS (MEDIDAS EN CM.).	35
FIGURA 31. SUPERFICIE REPRESENTATIVA DE BERENJENAS (MEDIDAS EN CM.).	36
FIGURA 32. UBICACIÓN PFV EL ÁGUILA	37
FIGURA 33. BANCO DE PRUEBAS BIFACIAL (IZQ.) Y UBICACIÓN ZONA DE PRUEBAS DE ALBEDO (DER.)	38
FIGURA 34. INSTALACIÓN PLÁSTICOS (IZQ.) Y ESTRUCTURA PARA LA MEDICIÓN DE ALBEDO (DER.)	40
FIGURA 35. ESQUEMA UBICACIÓN DE LAS SUPERFICIES (IZQ.) Y VISTA FINAL DE LA INSTALACIÓN (DER.)	40
FIGURA 36. INSTALACIÓN DATALOGGER Y BATERÍAS.	41
FIGURA 37. GHI Y RHI REGISTRADOS PARA EL DÍA 28 DE OCTUBRE (CASO PLÁSTICO AGRÍCOLA).	42
FIGURA 38. ALBEDO INSTANTÁNEO REGISTRADO PARA EL DÍA 28 DE OCTUBRE (CASO PLÁSTICO AGRÍCOLA)	43
FIGURA 39. COMPARACIÓN ALBEDO NORMALIZADO (ROSA) E INSTANTÁNEO (AZUL) PARA EL PLÁSTICO AGRÍCOLA.	44
FIGURA 40. ALBEDOS NORMALIZADOS DIARIOS PARA EL PLÁSTICO AGRÍCOLA (AZUL) Y LA TIERRA (NARANJA).	45
FIGURA 41. RADIACIÓN REFLEJADA PLÁSTICO VS ÁNGULO AZIMUT.	48
FIGURA 42. RADIACIÓN REFLEJADA PLÁSTICO VS ÁNGULO CENITAL.	48
FIGURA 43. RADIACIÓN REFLEJADA PLÁSTICO VS RADIACIÓN INCIDENTE.	48
FIGURA 44. RADIACIÓN REFLEJADA TIERRA VS ÁNGULO AZIMUT.	49
FIGURA 45. RADIACIÓN REFLEJADA TIERRA VS ÁNGULO CENITAL.	49
FIGURA 46. RADIACIÓN REFLEJADA TIERRA VS RADIACIÓN INCIDENTE.	49
FIGURA 47. TRAYECTORIA SOLAR PARA EL VALLE DE LLUTA [51].	50
FIGURA 48. RADIACIÓN REFLEJADA EMPÍRICA Y MODELADA PARA EL CASO DE PLÁSTICO.	53
FIGURA 49. RADIACIÓN REFLEJADA EMPÍRICA Y MODELADA PARA EL CASO DE TIERRA.	53
FIGURA 50. RADIACIÓN REFLEJADA EMPÍRICA Y MODELADA PARA EL CASO DEL PLÁSTICO.	54
FIGURA 51. RADIACIÓN REFLEJADA EMPÍRICA Y MODELADA PARA EL CASO DE TIERRA.	55

FIGURA 52. ESQUEMA PRINCIPIO TEÓRICO FACTOR DE VISIÓN. ....	56
FIGURA 53. ÁREA ESCOGIDA PARA LAS SUPERFICIES REPRESENTATIVAS EN COMPARACIÓN PANEL FOTOVOLTAICO. ....	58
FIGURA 54. ESQUEMA DE LOS PASOS REALIZADOS POR EL MÉTODO DE MONTE CARLO PROGRAMADO. ....	59
FIGURA 55. FACTOR DE VISIÓN <i>Fcebolla</i> – <i>panel</i> DE ACUERDO A LA POSICIÓN BAJO EL PANEL. CEBOLLAS R=1 (ARRIBA IZQ.), R=2 (ARRIBA DER.), R=3 (ABAJO IZQ.) Y R=4 (ABAJO DER.).....	61
FIGURA 56. FACTOR DE VISIÓN <i>Fberenjena</i> – <i>panel</i> DE ACUERDO A LA POSICIÓN BAJO EL PANEL. BERENJENAS R=3 (ARRIBA IZQ.), R=6 (ARRIBA DER.), R=9 (CENTRO IZQ.) Y R=12 (CENTRO DER.) Y R=15 (ABAJO).....	62
FIGURA 57. MAPA DE CALOR DE IRRADIANCIA PARA EL CASO 1.....	65
FIGURA 58. MAPA DE CALOR DE IRRADIANCIA PARA EL CASO 2.....	65
FIGURA 59. MAPA DE CALOR DE IRRADIANCIA PARA EL CASO 3.....	66
FIGURA 60. MAPA DE CALOR DE IRRADIANCIA PARA EL CASO 4.....	66
FIGURA 61. RECURSO SOLAR DISPONIBLE SEGÚN CADA CASO. RADIACIÓN GHI (AZUL) COMPARADA CON LA RADIACIÓN DIFUSA (NARANJA). CASO 1 (ARRIBA-IZQ.), CASO 2 (ARRIBA-DER.), CASO 3 (ABAJO-IZQ.) Y CASO 4 (ABAJO-DER.).....	67
FIGURA 62. ALBEDO EFECTIVO DIARIO PARA CASO 1 (AZUL) Y CASO 3 (NARANJA).....	69
FIGURA 63. ALBEDO EFECTIVO DIARIO PARA CASO 2 (AZUL) Y CASO 4 (NARANJA).....	70
FIGURA 64. RADIACIÓN REFLEJADA Y GHI PARA EL CASO 1.....	71
FIGURA 65. RADIACIÓN REFLEJADA Y GHI PARA EL CASO 2.....	72
FIGURA 66. RADIACIÓN REFLEJADA Y GHI PARA EL CASO 3.....	72
FIGURA 67. RADIACIÓN REFLEJADA Y GHI PARA EL CASO 4.....	73
FIGURA 68. EVOLUCIÓN GANANCIA BIFACIAL EN EL AÑO. CASO 1 Y 2.....	78
FIGURA 69. EVOLUCIÓN GANANCIA BIFACIAL EN EL AÑO. CASO 3 Y 4.....	79
FIGURA 70. COMPARACIÓN GENERACIÓN DC MENSUAL PARA EL CASO 1. CONFIGURACIÓN MONOFACIAL (IZQ.) Y BIFACIAL (DER.).....	80
FIGURA 71. COMPARACIÓN GENERACIÓN DC MENSUAL PARA EL CASO 2. CONFIGURACIÓN MONOFACIAL (IZQ.) Y BIFACIAL (DER.).....	80
FIGURA 72. COMPARACIÓN GENERACIÓN DC MENSUAL PARA EL CASO 3. CONFIGURACIÓN MONOFACIAL (IZQ.) Y BIFACIAL (DER.).....	81
FIGURA 73. COMPARACIÓN GENERACIÓN DC MENSUAL PARA EL CASO 4. CONFIGURACIÓN MONOFACIAL (IZQ.) Y BIFACIAL (DER.).....	81
FIGURA 78. NORMA DE RIVERSIDE: PARA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DE RIEGO [47].....	97

# Capítulo 1: Introducción

Asegurar el suministro alimenticio y energético a la población han sido históricamente, y seguirán siendo, prioridades sociopolíticas a nivel regional, nacional y global. Más aún, ante un contexto de incertidumbre producto de potenciales cambios generados por el aumento de la población mundial y el fenómeno de cambio climático. El fortalecimiento de la producción energética y alimentaria surge como un desafío clave bajo para generar resiliencia.

Existen variados factores que determinan los desafíos a los cuales se ve enfrentada la cadena alimenticia, entre los cuales destacan: 1) La disponibilidad de alimentos, 2) Satisfacer la creciente diversificación de la demanda, 3) Cumplir con estándares de calidad (seguridad, sustentabilidad, bienestar global y ética), mientras 4) se mantiene a un nivel accesible para todos los niveles de ingreso en la sociedad [1].

Por otra parte, existe una correlación directa entre el consumo de energía y el aumento de la población (ver Figura 1). Esto sugiere que la demanda de electricidad y el consumo de alimentos aumentarán proporcionalmente en la medida que la población mundial aumenta, y la Asociación Internacional de Energía sostiene que, si bien el plan de descarbonización mundial tomará marcha en las próximas décadas, la capacidad instalada de variadas fuentes de energía seguirá en alza, siendo la energía solar la protagonista (Ver Figura 2). Debe considerarse que a la fecha, las

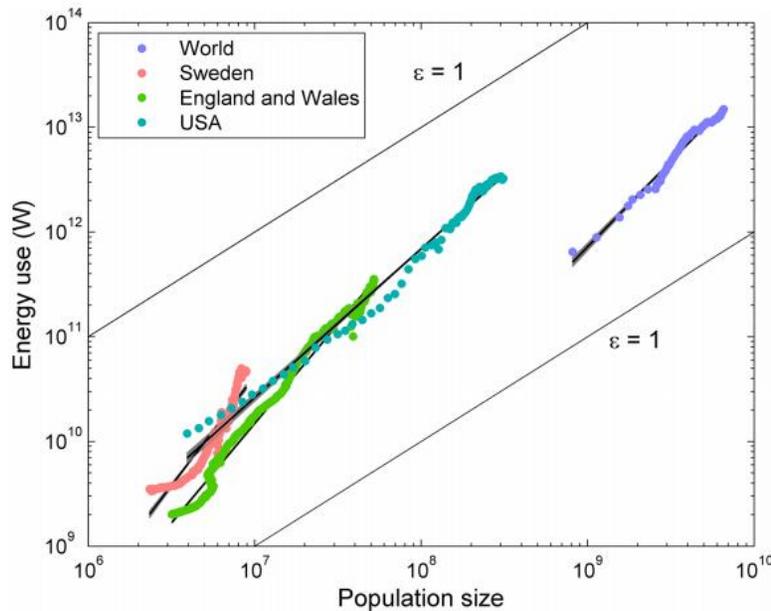


Figura 1: Correlación entre población y consumo de energía en Suecia, Inglaterra y Gales, Estados Unidos y el mundo [2].

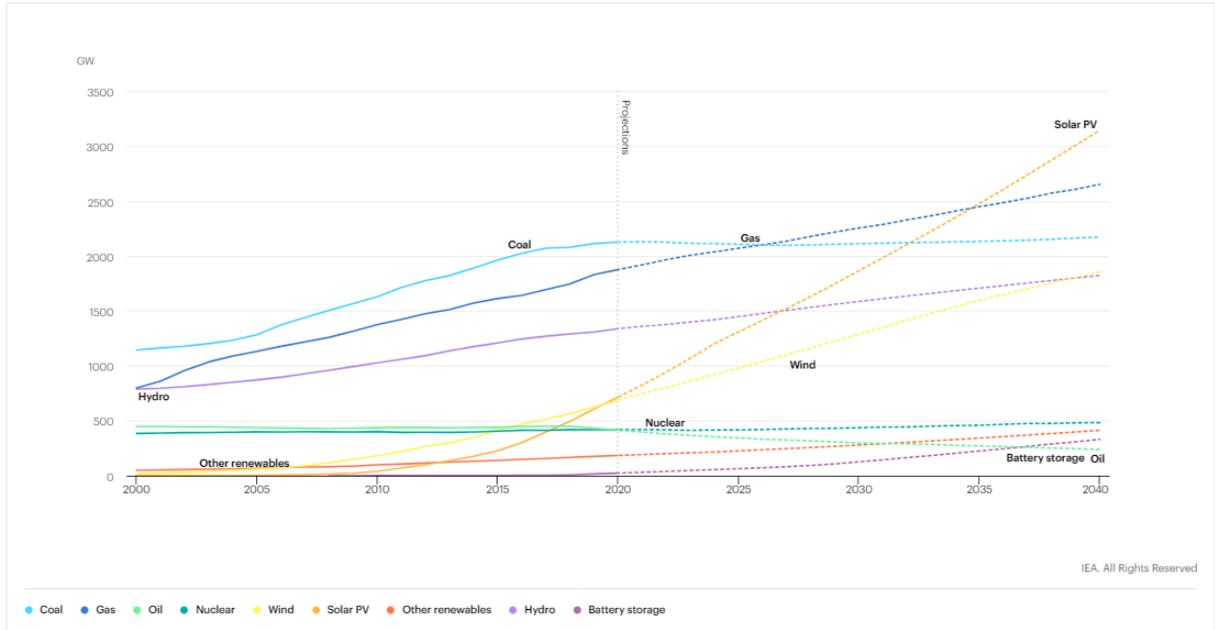


Figura 2. Incremento de la capacidad instalada en el mundo proyectada para el 2040 por fuente de energía [3].

Dada la intrínseca relación entre suministro de alimento y suministro de energía, ambos relacionados al aumento de población mundial, investigadores en diversas partes del mundo [4] [5] han evidenciado el dilema existente para con el uso de suelo: ¿Agricultura o Energía?

En ese contexto, la innovación ha jugado un rol fundamental para evitar el desgaste en la discusión y encontrar puntos de convergencia en sinergia, llegando a un concepto que ha tomado interés global durante los últimos años: Los sistemas Agrovoltaicos. Este tipo de sistemas busca optimizar el uso de suelo elevando la instalación fotovoltaica para convivir con un cultivo. Durante el año 2018 se realizaron pilotos en Alemania y Chile, llegando a potencias de 195 kWp en Alemania cerca del lago Constance, y a 13 kWp en las comunidades de El Monte, Curacaví y Lampa [6].

Estos pilotos han tenido un nivel de potencia bajo, indicando que el Technology Readiness Level (TRL) [7] de un sistema agrovoltaico está actualmente en el denominado *valle de la muerte*, proceso en el que una tecnología con potencial comercial e industrial puede fallar, en caso de no contar con herramientas sistemáticas que eleven sus capacidades hacia un punto de seguridad en la rentabilidad de la inversión privada [8].

En particular, la energía solar ha visto un incremento en su rendimiento producto de la sobrevivencia a este valle de una tecnología en particular: los paneles bifaciales. Estos paneles tienen la capacidad de poder extraer la radiación que se refleja en el suelo y que en sistemas monofaciales se pierde.

La motivación de este trabajo de titulación radica en aportar con una herramienta sistemática que ayude a los sistemas agrovoltaicos a llegar a TRL altos (8-9), permitiendo reducir la incertidumbre en sus niveles de inversión aumentando la rentabilidad de sus

operaciones. Actualmente, no existe a la fecha un piloto agrovoltaico que utilice paneles bifaciales, y tampoco las herramientas de simulación de sistemas fotovoltaicos más usadas en el mundo (profundizadas más adelante) son capaces de capturar de manera adecuada la capacidad de co-existir entre un cultivo y un sistema fotovoltaico bifacial.

La empresa ENGIE Laborelec, uno de los centros de I+D del grupo francés ENGIE, lleva realizando investigación en paneles bifaciales desde su llegada al país en la convocatoria de centros de excelencia de CORFO, y durante el año 2019 ha manifestado su interés en llevar a TRL altos la combinación de cultivos y sistemas fotovoltaicos bifaciales, dada la poca diversidad geográfica de Bélgica (su país de origen) y la gran posibilidad de hacer investigación de calidad en el norte de Chile, conocidos los niveles de radiación solar con los que goza nuestro país. La buena relación con la que sus actividades se han realizado en la zona ha levantado el interés en el Valle de Lluta, siendo un potencial lugar para realizar un piloto que escale la tecnología.

## **1.1. Objetivos**

A continuación se presentan los objetivos, tanto a nivel general como específico que persigue este trabajo.

### **1.1.1. Objetivo general**

Diseñar una metodología sistemática que permita la evaluación del desempeño de generación eléctrica para un sistema agrovoltaico con paneles bifaciales, aplicado a dos localidades del Valle de Lluta.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

1. Identificar las ventajas y oportunidades asociadas a la instalación de sistemas APV bifaciales en el valle de Lluta.
2. Caracterizar los componentes de interés de los suelos presentes en la locación seleccionada y representarlos por medio de *superficies representativas*.
3. Obtener, por medio de métodos experimentales y revisión bibliográfica, el comportamiento de reflexión y/o albedo de los componentes de las superficies escogidas.
4. En base a los datos obtenidos, obtener y validar un modelo para predecir el comportamiento reflectivo de las componentes de las superficies representativas en otras ubicaciones y ante distintas condiciones del Sol.
5. Definir el efecto sobre el panel fotovoltaico de la posición y distribución de los componentes de los suelos representativos, por medio del factor de visión.
6. En base a los puntos 4 y 5, poder estimar finalmente la reflexión generada por las superficies representativas del Valle de Lluta y sus correspondientes valores de albedo a lo largo de un año meteorológico típico (TMY)

7. Realizar una comparación entre la producción energética de paneles bifaciales y monofaciales mediante herramientas de simulación, para las zonas seleccionadas y representadas.

## 1.2. Alcances y metodología

A continuación se presentan los alcances que componen la estructura general del trabajo.

Con respecto al primer objetivo específico, se plantea la identificación del contexto actual, junto a las potenciales ventajas y oportunidades mediante un estudio bibliográfico que incluye documentos pertinentes desarrollados específicamente para la zona del valle de Lluta, tanto por organismos gubernamentales como estudios de investigación disponibles. Este proceso es complementado por una visita en terreno que permite conocer el área, identificar sus principales características y obtener información proveniente de los agricultores locales mediante conversaciones y encuestas.

A continuación, para lograr una caracterización adecuada de la zona, se escogen dos localidades y se trabaja en conjunto con los agricultores de cada una de estas para la correcta determinación de las superficies representativas. Estas últimas son definidas en base a los cultivos de mayor aplicación a la fecha, su modo de cultivo actual en la zona y las actividades de manejo realizadas comúnmente durante un año.

Una vez identificadas las componentes de cada superficie representativa, la obtención del comportamiento reflectivo y valores de albedo de cada una de estas es realizado mediante montajes y métodos experimentales adecuados, instalados en un área demarcada en la Planta Fotovoltaica El Águila, perteneciente al grupo ENGIE, en Arica. Para estas mediciones se considera un tiempo de medición mínimo (2 meses) para poder obtener valores estables. Aquellos componentes que no pueden ser definidos mediante la obtención directa en terreno, son estimados de acuerdo a la información disponible en la bibliografía pertinente.

La medición de estos datos en terreno se realiza mediante un montaje diseñado con el fin de minimizar la intervención de este sobre el entorno. El proceso de captura de datos se desarrolla por medio de equipos piranómetros *Kip&Zonen* y sistemas de manejo y almacenamiento de datos *Data Logger*.

El modelo estimador es definido en base a los datos obtenidos en la etapa anterior. El principal objetivo de este modelo consiste en poder estimar el comportamiento reflectivo de los mismos materiales testeados al ser ubicados en otras zonas y ser sometidos a condiciones de radiación diferentes. El modelo corresponde a un ajuste de los datos en base a parámetros que serán definidos por su impacto, tanto teórico como evidenciado. De la totalidad de datos disponibles, dos tercios (2/3) serán destinados a la creación del modelo, mientras que el tercio (1/3) restante será destinado a la validación del mismo.

El impacto de la ubicación de cada componente bajo el panel fotovoltaico será evaluado según el concepto de factor de visión. Para la obtención de estos, será considerado un panel fotovoltaico de características e instalación por definir, ubicado justo al centro del área comprendida por la superficie representativa. Para la estimación del factor de visión, el método iterativo de Monte Carlo es propuesto.

Una vez cumplido con todo lo anterior, la estimación final del albedo generado por las superficies seleccionadas es realizada como una combinación de la reflectividad y los factores de visión definidos. Los valores son presentados a lo largo de un año, utilizando como base las características meteorológicas de un año típico en cada ubicación. Para reducir la incertidumbre asociada a la veracidad de los datos meteorológicos y a sus métodos de obtención, se trabaja con dos bases de datos diferentes: Explorador Solar y National Solar Resource Data Base (NSRDB).

Posteriormente, para poder realizar una estimación válida del comportamiento de paneles fotovoltaicos bifaciales sobre suelos agrícolas del valle de Lluta, ya caracterizados, se utiliza la herramienta computacional de simulación System Advisor Model de NREL. En primer lugar esta herramienta es validada adecuadamente con un sistema fotovoltaico ya estudiado.

En esta etapa se lleva a cabo una serie de comparaciones entre las instalaciones bifaciales y monofaciales sobre los mismos suelos, a fin de evaluar el impacto teórico de la primera tecnología. Este impacto es centrado principalmente en la cantidad extra de radiación disponible para su conversión energética, generada por las superficies representativas antes trabajadas, y la energía eléctrica adicional generada a nivel del panel fotovoltaico. Por último, son también obtenidas las cantidades de generación de salida de la planta, considerando un sistema conversor de DC/AC adecuado para las tecnologías disponibles en la actualidad. Estos valores son presentados para poder realizar los análisis correspondientes de balance energético y ser comparables con mayor facilidad con otras configuraciones.

La metodología utilizada en este trabajo de investigación es resumida en el diagrama de flujo presentado en la Figura 3.

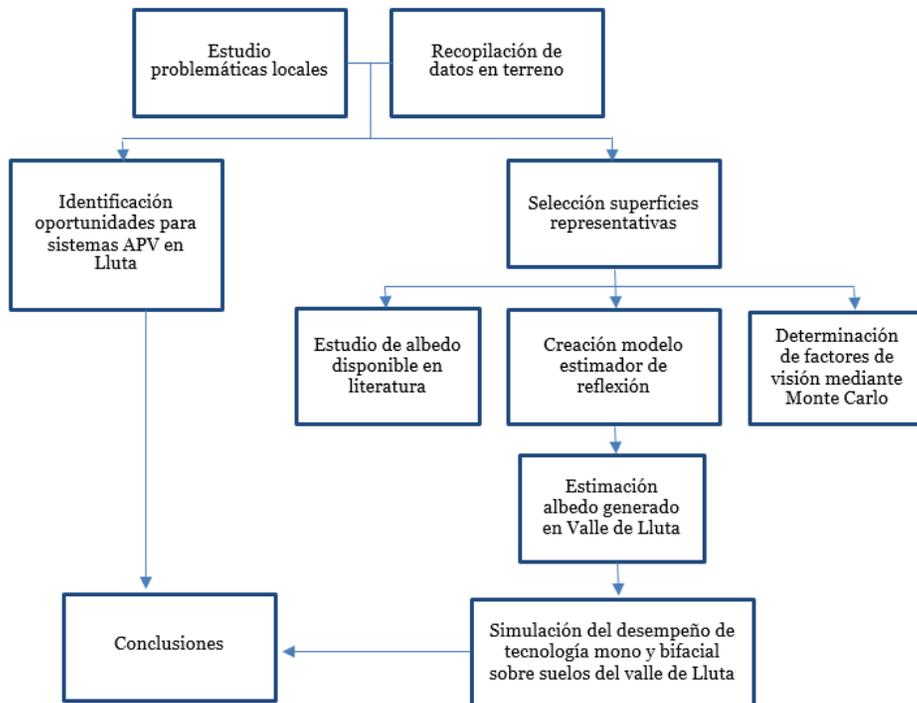


Figura 3. Diagrama de flujo metodología.

# Capítulo 2: Sistemas agrovoltaicos

## 2.1. Concepto APV

Se entiende como sistema agrovoltaico (AV), agrofotovoltaico (APV) o agroPV a la combinación de actividades agrícolas y de generación de energía ocurriendo de manera simultánea sobre un mismo terreno. Lo anterior con el objetivo de aprovechar los suelos disponibles de manera eficiente, administrando conjuntamente recursos naturales para alimentación y generación de energía. En resumen, considera el montaje de sistemas fotovoltaicos tradicionales con una disposición que permita el correcto desenvolvimiento de las actividades agrícolas requeridas para cada cultivo.

La creación de estos sistemas se presenta como una respuesta ante el aumento sostenido de la población y reducción de la tierra disponible, fenómenos presentes desde hace algunas décadas. Además, esto promueve el desarrollo de una agricultura más controlada, al mismo tiempo que se aporta con generación de electricidad sin emisiones contaminantes [9].

Actualmente, los sistemas APV poseen múltiples perspectivas de utilización, como las presentadas en las Figura 4 y Figura 5, donde se muestran aplicaciones en invernaderos y en acuicultura respectivamente. También, pueden encontrarse aplicaciones como sistemas purificadores de agua PV, sistemas de bombeo de agua PV, estaciones solares rurales, entre otros.



Figura 4. Invernadero APV.



Figura 5. Proyecto Jiangsu, TrinaSolar.



Figura 6. Planta Virgilio, AGROVOLTAICO, en Italia.



Figura 7. Piloto Agro PV Fraunhofer en Lampa.

La combinación de actividades dependientes de la energía del sol sobre un mismo terreno supone, en primer lugar, un mayor aprovechamiento de la energía contenida en la radiación incidente. Así, es de esperar que en la mayoría de los casos, los rendimientos individuales tanto de los cultivos (ton/ha), como de la generación de potencia (kWh/ha.), sean mejores si cualquiera de estas se desarrollara por sí sola, en vez de en el uso dual. Sin embargo, se ha visto que la producción conjunta de cultivos y electricidad podría tener, como consecuencia, un mayor rendimiento que cada actividad por sí sola [10].

El concepto de Relación Equivalente de Suelo (RES o LER por sus siglas en inglés) resulta útil para poder cuantificar lo expuesto anteriormente. Este valor, por lo común empleado para aportar información sobre la productividad de distintos cultivos sobre el mismo terreno, puede ser extendido para cualquier sistema que combine distintos tipos de producción sobre una misma área de suelo. En particular, en [11] es empleado para realizar una comparación del aprovechamiento de los suelos entre monocultivos y policultivos.

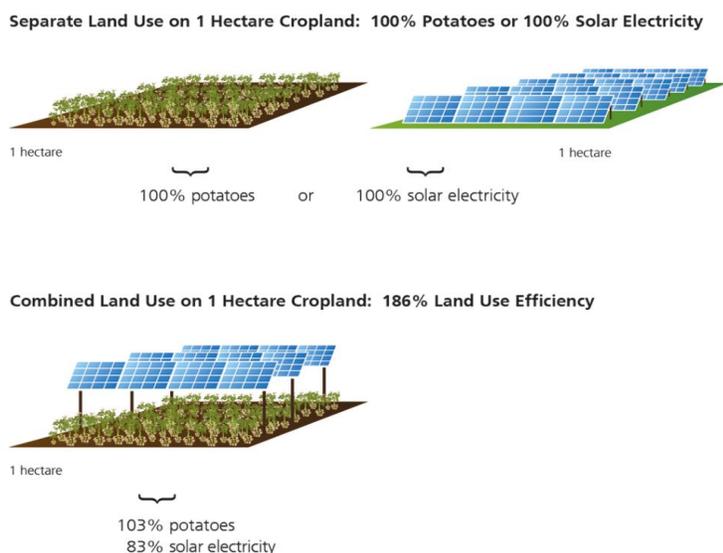


Figura 8. Uso eficiente del suelo. Caso Fraunhofer.

Por otro lado, en [12], este parámetro es utilizado adecuado al contexto de sistemas agrovoltaicos para evaluar la Relación Equivalente de Suelo, en un prototipo ubicado en Montpellier, Francia.

El valor del LER, para este caso, es definido como el cociente entre la productividad de los cultivos en el sistema agrovoltaico y en monocultivos, sumado con el cociente entre la energía eléctrica generada por los paneles en la configuración agrovoltaica comparada con el caso óptimo de producción PV.

$$LER = \left( \frac{Y_{cultivos AV}}{Y_{monocultivo}} \right) + \left( \frac{Y_{electricidad AV}}{Y_{electricidad PV}} \right) \quad 1.$$

Las simulaciones revelan que la productividad del terreno puede ser aumentada hasta en valores superiores al 70% en casos de instalaciones agrovoltaicas. Esto significa que, al

adoptar un sistema mixto, la producción sobre un área de 100 hectáreas será igual al producido en más de 170 hectáreas con producción separada.

En otro estudio similar enfocado a cultivos de maíz dedicados a la producción de biogás, los valores de LER muestran un aumento conjunto a la densidad de paneles, además, este valor aumenta aún más para instalaciones con sun-tracking en lugar de paneles estáticos, llegando a valores incluso superiores a 2 ( $LER > 2$ ) [13].

El Instituto para Sistemas Solares Fraunhofer ISE [14] confirma los niveles de aumento de la productividad de los suelos mediante el caso estudiado de una granja en Demeter, en el que fueron evaluados sistemas fotovoltaicos operando sobre plantaciones de papas. Para el año 2018, se alcanzaron valores de productividad de la tierra de 186%, como se presenta en la Figura 8.

El concepto agrovoltaico puede ser estudiado desde las distintas actividades que la componen. A continuación, se desarrolla un análisis enfocado al sistema fotovoltaico, tomando en consideración las ventajas y desventajas de la instalación de paneles fotovoltaicos sobre cultivos agrícolas. Además, se presentan las principales variables que afectan su desempeño, bajo esta configuración.

## **2.2. El componente fotovoltaico**

La evaluación de sistemas fotovoltaicos sobre terrenos empleados para otras actividades se ha desarrollado, no solo en suelos agrícolas, sino también en otras superficies.

En este contexto surge la siguiente pregunta: ¿dónde debiesen ser situadas las futuras instalaciones fotovoltaicas para que alcancen la mayor producción de energía dada la condición de escasez de suelo disponible? Esta interrogante plantea la importancia referente al microclima que distintos usos del suelo generan sobre el entorno y como esto afecta al desempeño de los paneles.

Los paneles solares fotovoltaicos y los distintos cultivos, ambos, situados en el mismo terreno común, tenderán a disputar el recurso solar disponible. En particular, puede observarse una gran similitud en el comportamiento de ambos componentes, en el cual la radiación solar es absorbida para la generación de un “producto” final: electricidad en el caso PV y biomasa o combustibles en el caso agrícola.

A pesar de las múltiples diferencias en sus procesos, los sistemas fotovoltaicos son considerados más eficientes en el proceso de captura de la energía que la misma fotosíntesis. Se estima que el rendimiento de la fotosíntesis se encuentra alrededor del 3% [15] y limitado por un máximo estimado en 8-9% bajo condiciones óptimas [16] para casos muy favorables, mientras que las últimas tecnologías PV han alcanzado valores cercanos al 26,7% para tecnologías mono-cristalinas y 22,3% para poli-cristalinas [17]

La operación de un módulo fotovoltaico se ve caracterizado tanto por la potencia generada como por el rendimiento alcanzado. El potencial del panel depende principalmente del nivel de irradiancia que se tenga en determinada locación.

Con respecto al rendimiento, este también se ve afectado por la temperatura de operación de las celdas, lo cual es función directamente de las características del microclima local. En [18] se desarrolla un modelo que estudia la eficiencia de paneles fotovoltaicos incorporando las características de microclima de diversas superficies. Así, se obtiene que la temperatura de operación depende de 4 principales variables del microclima: la insolación, velocidad del viento, temperatura y humedad. En base a esto, se obtuvieron los resultados expuestos en la Figura 9.

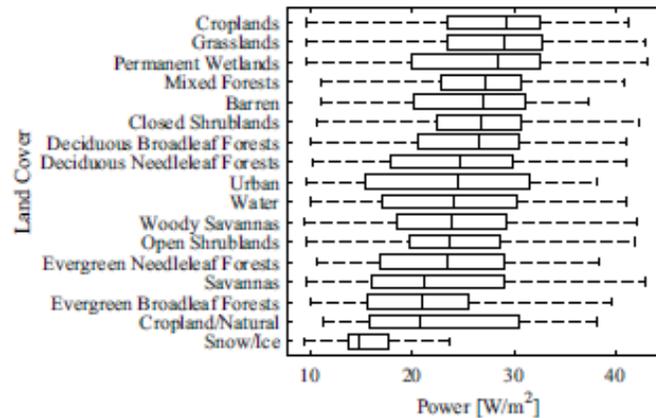


Figura 9. Potencial para instalación de tecnologías fotovoltaicas sobre distintos suelos.

De lo anterior, se concluye que las tierras de cultivos, de pasto y humedales permanentes son las superficies en donde los paneles fotovoltaicos alcanzan su mayor potencial. Los terrenos áridos, superficie donde comúnmente son instaladas las plantas solares, se ubican en el 5to lugar de este estudio.

### 2.3. La componente agrícola

El impacto que genera la componente fotovoltaica sobre la agrícola se manifiesta en dos principales focos: el primero corresponde a los efectos que pueden generarse sobre la producción agrícola, pudiendo ser favorables como adversos. Mientras que el segundo, se refiere a la disposición espacial y cómo esta es influenciada por los mismos productos agrícolas.

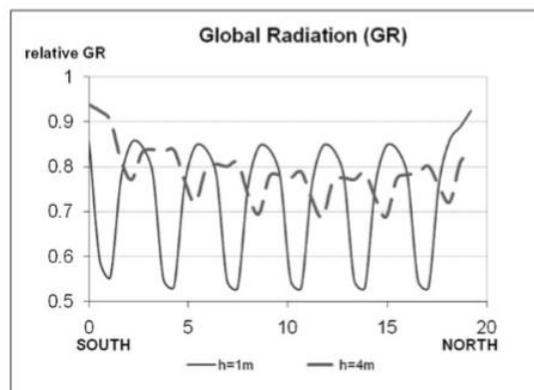


Figura 10. Radiación alcanzada a nivel del suelo vs altura instalación paneles [4].

En relación a este último tópico, en la literatura específica pueden encontrarse ciertas directrices basadas en casos experimentales y simulaciones.

Ellas, primer lugar, aconsejan que la altura de instalación de los paneles debe estar en concordancia con el tipo de cultivo plantado y el tamaño de las maquinarias utilizadas. Por ejemplo, para el cultivo de cereales - con sus grandes maquinas cosechadoras - se requiere un espacio libre de al menos 4-5 m. Además, esta variable influye en la homogeneidad con que la radiación alcanza el suelo, siendo mayor cuanto mayor es la altura de instalación.

En la Figura 10 se observa el efecto de la elevación de los paneles en la heterogeneidad de la distribución de la luz a nivel del suelo [12]

Por su parte, el espaciamiento entre filas de paneles también es un parámetro que debe ser considerado. Esta variable requiere ser diseñada de tal manera que permita el trabajo de grandes máquinas sin que la presencia de los paneles suponga un impedimento al común desarrollo de las actividades, y evitando posibles pérdidas de terreno cultivable. De todas maneras, dado el rápido desarrollo de maquinaria autónoma y de alta precisión, se espera que estas restricciones tiendan a decrecer [19].



Figura 11. Instalación agrofotovoltaica vertical.

Distintas configuraciones se presentan como opción para los sistemas Agro PV. Cada una con su respectivo balance entre ventajas y desventajas.

Como ejemplo particular de la relación entre paneles y cultivos se presenta la configuración de la Figura 11. La instalación vertical de paneles bifaciales [20] garantiza un porcentaje de ocupación de la tierra menor al 1% y se encuentra diseñado para situarse junto a cultivos que no requieren sombreado para su crecimiento.

Debido al poco espacio que utilizan los paneles, esta configuración registra un 90% de disponibilidad del suelo para aprovechamiento en actividades agrarias, destacando el perfil de generación obtenido, especificado en la Figura 12, con características complementarias al perfil de generación solar común. Cabe destacar que los valores allí consignados representan, únicamente los resultados correspondientes a las condiciones propias del lugar donde es desarrollado el proyecto (Dirmingen, Alemania).

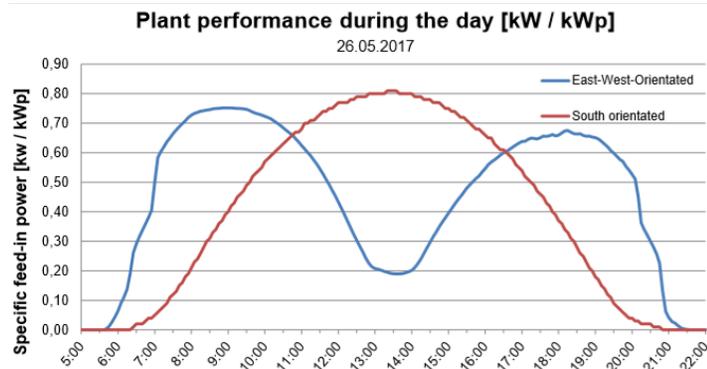


Figura 12. Desempeño paneles caso agrofotovoltaico vertical.

Si bien existen múltiples casos de desarrollo y aplicaciones de proyectos agrovoltaicos- como los mencionados más adelante, los impactos que estos generan sobre la producción de los cultivos han sido investigados parcialmente y aún no se han definido totalmente. En este sentido, es posible encontrar estudios que muestran efectos positivos sobre la actividad agrícola y otros que evidencian ciertas desventajas generadas.

De todas formas, hay características que emergen de ellos, que pueden ser consideradas comunes, ante cualquier estudio, en especial los comparativos de estos impactos, sobre los cultivos:

- 1) Los modelos de estudio de impacto son altamente complejos y variables, donde <el qué se cultiva> y < el dónde se realiza>, son esenciales de contemplar.
- 2) Es necesario incluir, para estos estudios, variables tanto comunes como específicas.
- 3) Sólo serían, en principio, comparables, aquellos proyectos realizados en similares condiciones (*ceteris paribus*).

Tabla 1. Comparativa entre ventajas y desventajas de los sistemas agrofotovoltaicos.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Mayor aprovechamiento de suelos disponibles	Disminución de contenido nutricional de algunos cultivos
Favorecimiento al crecimiento de cultivos que requieren menos luz	Impacto en el rendimiento de cultivos que requieren mayores índices de luz
Aumento eficiencia de paneles fotovoltaicos por temperatura de operación	Efecto negativo sobre la estructura de los paneles causado por humedad del microclima

De un modo general, la presencia de los paneles altera el microclima local, lo cual genera consecuencias, a su vez, sobre los cultivos. En este sentido, la principal restricción ecofisiológica para la productividad de la planta bajo paneles fotovoltaicos resulta de la reducción de luz [12]. Además de la reducción en la radiación que alcanza efectivamente a esta - reducción estimada en un tercio de la radiación total [19]-, también se generan cambios en la temperatura y humedad del suelo.

Los efectos mencionados originan variaciones en la cantidad de biomasa producida y, muchas veces, en el contenido nutricional del cultivo.

De acuerdo con [21], la unión de las actividades agrícolas y de producción de energía solar fotovoltaica genera solo ventajas para ambos componentes, sin embargo, en [22] se observa el caso contrario al documentarse pérdidas en la productividad del 50% bajo un sombreadamiento del 80% para especies de trébol blanco. Esto, sumado a un mejor manejo de la tierra y el agua disponible, convierten a los sistemas APV en opciones *win-win* (todos ganan).

Gracias a este estudio, realizado por investigadores de la Universidad de Arizona, en el cual fueron monitoreadas las variables microclimáticas, tales como: la temperatura de los paneles, humedad del suelo y el uso del agua en los sistemas de riego; además de parámetros de los cultivos como su función fisiológica y la producción de biomasa, se obtuvieron resultados positivos tanto para los paneles como para los cultivos.

También, allí se concluyó que el sombreadamiento generado por los paneles redujo el estrés por sequía en cultivos de ají Chiltepin, jalapeño y tomates cherry, aumentando también su producción. Puntualmente, se encontró: una producción tres veces superior para el ají Chiltepin; dos veces para el tomate y para el jalapeño, pero con un 65% menos de pérdidas de agua por transpiración.

Estudios como este surgen como una herramienta útil para acabar con la disputa por el uso de los terrenos que actualmente sufren algunos países, como es el caso de Holanda [23].

En otro caso desarrollado en terreno [24], para distintas variedades de lechugas, cultivadas bajo diferentes disposiciones, de paneles solares, los resultados arrojaron rendimientos entre el 81-99% del registrado a pleno sol; y, con dos variedades de lechuga, incluso superando el 100%, evidenciando, así, un comportamiento favorable en las especies de lechugas cultivadas en sistemas agrovoltáicos.

El impacto del sombreadamiento y los cambios en el microclima también han sido evaluados sobre cultivos de maíz. En [13], una simulación fue realizada incorporando la patente de seguimiento solar Agrovoltáico dispuesto sobre cultivos de maíz y considerando 40 años de datos históricos meteorológicos. Las simulaciones mostraron un efecto en la temperatura promedio del suelo, evapotranspiración y balance del agua del suelo, las cuales significaron condiciones más favorables para el crecimiento de la planta que en condiciones a plena luz. Como consecuencia, la eficiencia promedio del maíz se mostró más estable e incluso mayor y con una gran expectativa para el desarrollo de estos sistemas en condiciones de sequía; otorgando, adicionalmente, resguardos para escenarios de cambio climático.

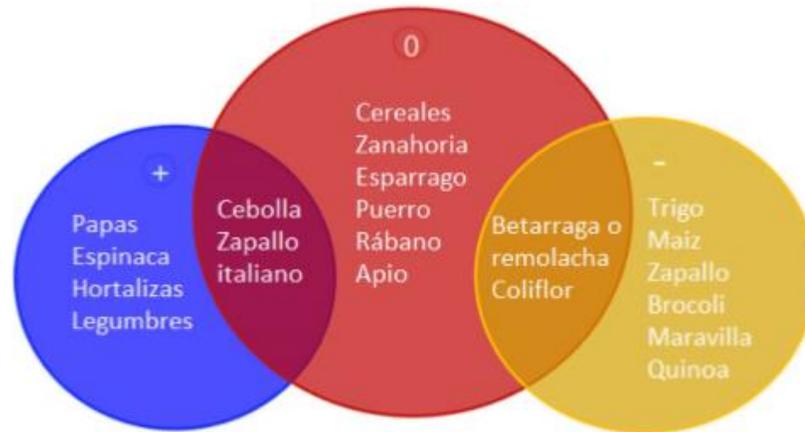


Figura 13. Impacto de la instalación de paneles sobre distintos cultivos según Fraunhofer ISE [19]

Otras estimaciones fueron realizadas en la casa matriz de Fraunhofer ISE, en Alemania para el caso de diferentes cultivos en Europa Central. Los resultados de estas son presentados en la Figura 13, donde se califican algunos productos entre aquellos que podría ver beneficiada su producción al disponer de un 30% menos de radiación (círculo azul), los que no sufrirían variaciones en su rendimiento (círculo rojo) y por último, los productos que la reducción les afectaría negativamente (círculo amarillo).

En el último tiempo, los casos aplicados de APV han aumentado, logrando incorporar cada vez más tipos de productos agrícolas a estos sistemas duales.

Otros cultivos que han sido evaluados bajo sombreado son: berenjena, pepino, maní [25], alfalfa [26], entre otros.

## 2.4. Casos documentados

Un gran número de montajes comerciales y/o de investigación han sido emplazados en el último tiempo. A continuación se realiza una pequeña selección de todos los casos documentados [19].

- El primer piloto agrovoltaico registrado corresponde al ya mencionado caso de Montpellier, en el sur de Francia.
- A nivel mundial, además, destaca el reciente proyecto 'Agrovoltaico' [27], compuesto de por tres proyectos comerciales en el norte de Italia. Cada sistema instalado cuenta con paneles con seguimiento situados a una altura de entre 4-5 m y con una capacidad nominal de 1500kWp.
- Ese mismo concepto ha sido extendido a China, donde fue instalada la planta AGROVOLTAICO en Jinzhai con una potencia de 545 kWp. En la misma localidad se encuentra situado el proyecto de acuicultura PV Xiangshui, mostrado en la Figura 5. Con una capacidad instalada de 120 MW y 480.000 módulos TrinaSolar, este proyecto provee a la industria pesquera local y además inyecta energía verde a la ciudad de Xiangshui [28].

- En el caso de Chile, la mayor actividad ha sido impulsada por la alemana Fraunhofer [29] con instalaciones realizadas preferentemente en la zona central, específicamente en los sectores de Curacaví, Lampa y El Monte. Las tres estaciones piloto se encuentran funcionando y aprobadas por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) desde diciembre de 2017. Cada una de las plantas cuenta con 48 paneles de 260 Wp cada uno, lo cual se traduce en un total de 146 paneles y una potencia total de 37.44 kWp instalada.

## **2.5. El caso en climas áridos**

Una aplicación prometedora de los sistemas APV puede esperarse para regiones áridas con climas adversos para la mayoría de los cultivos. En este contexto, la producción de los cultivos puede verse beneficiada por el aumento en la eficiencia del uso del agua y la reducción de los posibles efectos adversos causados por el exceso de radiación.

Mientras la viabilidad económica de estos sistemas incrementa, permite la electrificación en zonas rurales [19].

Los sistemas APV mejoran la eficiencia en el uso del agua y ayudan a prevenir pérdidas, especialmente valorizadas en climas áridos. Este aumento en la eficiencia se da pues el sombreado tiende a reducir la evaporación y transpiración en las plantas por medio de la reducción de luz incidente. Además, entregan la oportunidad para gestionar un sistema de riego más eficiente [30].

En la misma línea, estudios realizados por Fraunhofer en el año 2018 indican que las instalaciones agrofotovoltaicas son una buena opción para las regiones con poca lluvia [31], pudiendo mejorar rendimientos e incluso ampliando la variedad de potenciales cultivos en la zona.

Esta fortaleza en el uso de instalaciones agrovoltaicas resulta de especial interés para el caso de Chile, donde se cuenta con extensas zonas áridas en las que actualmente se intentan desarrollar actividades agrarias. Fraunhofer ha investigado al respecto en la zona norte de la Región Metropolitana, sin embargo no se ha encontrado evidencia sobre trabajos similares en la zona norte del país.

## Capítulo 3: Tecnología bifacial PV

En esta sección se introduce el concepto de tecnología fotovoltaica bifacial. Para lo cual:

- se analizan sus principales características,
- se desarrolla una comparación con respecto al estándar monofacial, y finalmente,
- se presentan las distintas tecnologías disponibles en la actualidad.

Debido al rol dominante del silicio por sobre otras alternativas de sustrato tanto en documentos de investigación como en el mercado PV actual [32], el concepto celda bifacial hará referencia a estas últimas, ya sean mono o policristalinas.

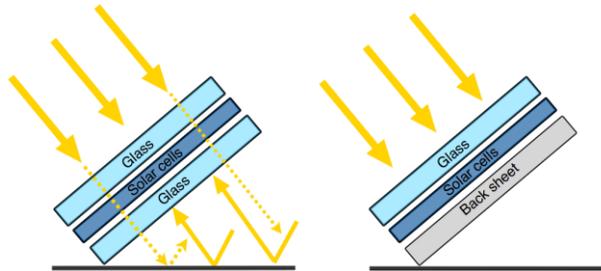


Figura 14. Esquema diferencias tecnología bifacial (izq.) y monofacial (der.).

Las celdas solares bifaciales son capaces de utilizar simultáneamente radiación por la parte frontal y posterior del dispositivo para la producción de energía eléctrica.

Esto representa una ventaja con respecto a su contraparte monofacial, ya que el módulo bifacial es capaz aumentar la producción de energía por metro cuadrado y al mismo tiempo reducir los costos referentes al área utilizada en sistemas fotovoltaicos.

La ganancia bifacial de estos módulos ha aumentado en el último tiempo gracias al continuo desarrollo de esta tecnología, llegando incluso a valores superiores al 20% como los reportados por la empresa desarrolladora de módulos China Longi en [33].

Además de estas ventajas, la ausencia de una zona posterior –como el Al Backsurface field presente en las celdas monofaciales más comunes–:

- reduce las pérdidas eléctricas por recombinación,
- evita el efecto de pandeo de la celda por los distintos coeficientes de expansión térmico entre el aluminio y el silicio [32]
- y disminuye la temperatura de operación de la celda debido a una menor absorción de la radiación infrarroja [34]. Esta disminución de la temperatura de operación permite a la celda bifacial lograr una mayor eficiencia en su operación.

### 3.1 Principales parámetros y variables

Se define en primer lugar el concepto de ganancia bifacial, el cual hace referencia a la energía adicional que alcanza al panel y/o que genera este. Así, puede tenerse una ganancia bifacial con respecto a la radiación que efectivamente alcanza al panel, como también, a la nueva generación energética alcanzada gracias a la operación de ambas

caras. Dicho esto, resulta necesario explicitar la variable a la que se hace referencia al hablar de la ganancia bifacial.

Considerando lo anterior y lo encontrado de manera más frecuente en la literatura, el concepto de ganancia bifacial suele ser utilizado para describir la producción energética extra de la configuración bifacial en comparación con la monofacial. La ecuación 2 exhibe la definición de la ganancia bifacial energética (BGE):

$$\text{Ganancia bifacial (BG)} = \frac{E_p}{E_f} \quad 2.$$

Donde  $E_p$  corresponde a la energía generada por la cara posterior del módulo y  $P_f$  a la producida por la cara frontal, ambas evaluadas bajo condiciones estándar (STC). Este valor depende principalmente de factores geométricos de la instalación, tales como altura, inclinación, largo del módulo y espaciamiento entre filas, y de las condiciones propias de la celda y el suelo [35]. En [36] se obtiene el efecto combinado de parámetros de instalación sobre la ganancia bifacial, utilizando el sistema de simulación y renderizado de iluminación RADIANCE [37] para las condiciones de Albuquerque en Nuevo México, EEUU.

De allí, se desprende que la ganancia bifacial es directamente proporcional al nivel de albedo del suelo, tal como se indica en la columna de la izquierda de la Figura 15, donde se presentan los resultados obtenidos para un módulo bifacial con respecto a su ganancia bifacial y el porcentaje de albedo para tres días sin nubes en distintas épocas del año.

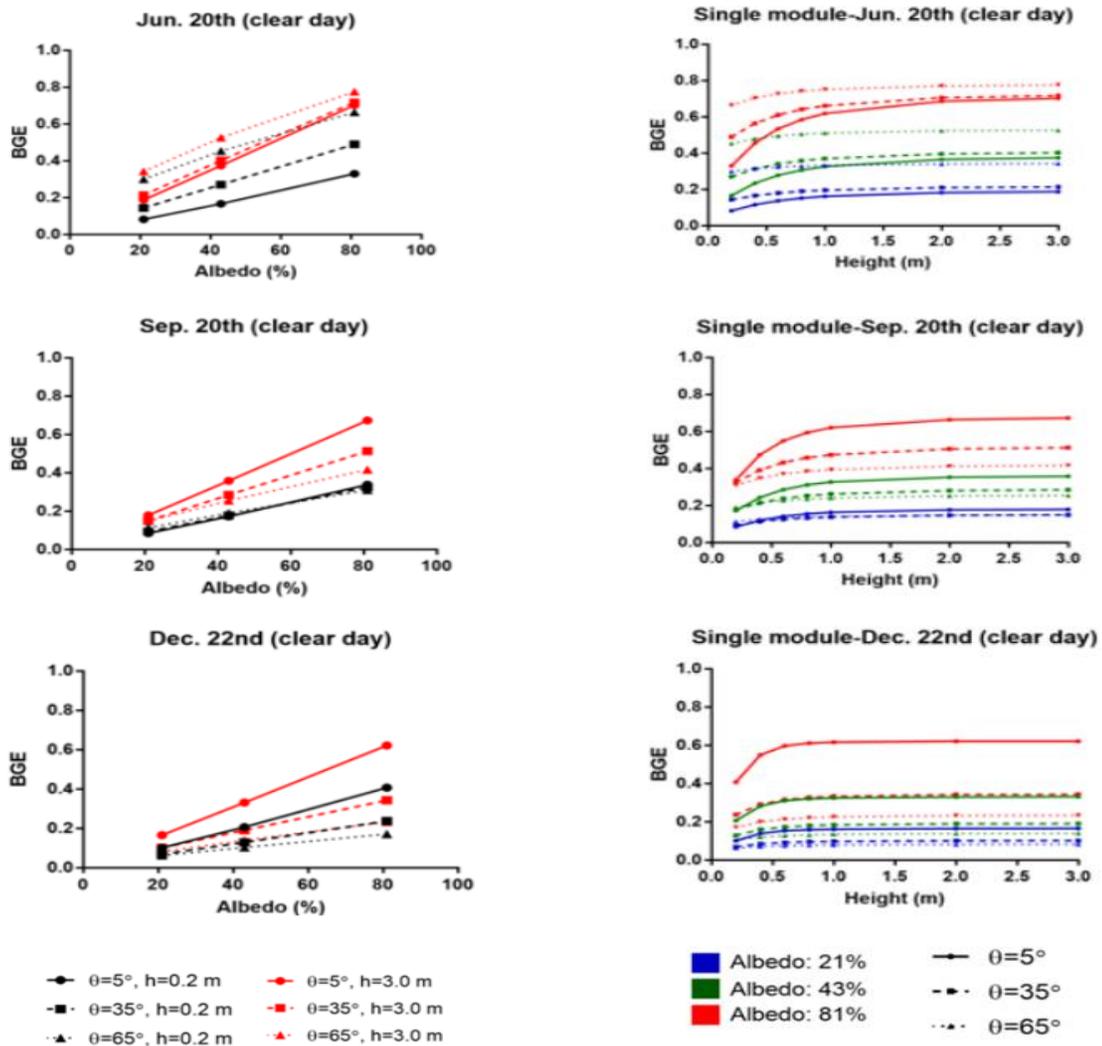


Figura 15. Efecto del albedo sobre BGE (columna izq.) y efecto de altura de instalación sobre BGE (columna der.)

La columna derecha de la Figura 15 exhibe el mismo comportamiento para la ganancia bifacial con respecto a la altura de instalación del panel, esto hasta un cierto valor desde el cual ya la dependencia y el aporte son menos importantes. El ángulo de inclinación óptimo, por otro lado, es más difícil de calcular, pues depende directamente de otros parámetros como altura, albedo, tamaño del sistema y la época del año, siendo generalmente mayor para módulos instalados más cerca del suelo.

### Factor de bifacialidad

Las celdas bifaciales se caracterizan de acuerdo a su factor de bifacialidad.

Este concepto compara las eficiencias de la cara posterior y frontal, ambas testeadas bajo STC y definen la importancia de la producción posterior en función de la frontal o principal. Como consecuencia de un mayor factor de bifacialidad, la producción energética aumenta. En general, el factor de bifacialidad de las tecnologías existentes en la actualidad es superior al 70%, siendo aceptados los valores presentados en la sección 2.1.2.

$$\text{Factor de bifacialidad} = \left[ \frac{\eta_{\text{frontal}}}{\eta_{\text{posterior}}} \right] \times 100 \quad 3.$$

## **El Albedo**

La radiación que alcanza efectivamente la superficie terrestre se divide en dos componentes: directa (DNI) y difusa (DHI).

Se entiende como radiación directa a la que es transmitida por una línea recta proveniente desde la posición del sol hasta la superficie de la Tierra y difusa a la que ha sido refractada por moléculas y partículas en la atmósfera y que se distribuye de igual manera en todas las direcciones (supuesto de anisotropía).

Por su parte, la radiación total sobre una superficie horizontal al suelo se denomina Irradiación global horizontal (GHI) y consiste en la suma de la DHI y de la componente perpendicular a la superficie de la DNI.

Los módulos fotovoltaicos reciben tanto las irradiaciones DNI y DHI como también la reflejada por otras superficies. Esta última componente, denominada albedo, toma especial importancia en el caso de la tecnología bifacial.

Se define albedo como la relación entre la potencia de la radiación reflejada por una superficie con respecto a la potencia total incidente. Esta medida muestra qué tan bien refleja la radiación proveniente de Sol una determinada superficie y su valor puede variar entre 0% para un cuerpo negro ideal y 100% para un cuerpo totalmente blanco.

Este concepto no hace referencia a la cantidad de luz recibida por la cara posterior del panel bifacial, el cual es correctamente llamado como “irradiación de la cara posterior”. Es usual asumir que la luz reflejada se dispersa de manera homogénea hacia todas direcciones. Fenómeno denominado como “reflexión difusa”.

El albedo puede ser medido mediante dos piranómetros colocados horizontalmente, uno apuntando hacia arriba para capturar la radiación incidente y el otro mirando hacia abajo y capturando la radiación reflejada. Además, también puede ser medido por medio de celdas de referencia, la cuales entregan el valor de albedo efectivo referente al porcentaje de la radiación reflejada que efectivamente es aprovechable por el panel fotovoltaico. Este último concepto depende fuertemente de las características del material de sustrato de la celda, el que comúnmente es silicio.

Por razones de comparación de medidas y resultados, generalmente el uso de piranómetros es más aceptado, ya que poseen un rango de medición mayor al espectro de radiación solar. La Tabla 2 presenta los valores de albedo efectivo para diversas superficies.

Tabla 2. Albedo efectivo para distintas superficies [38]

Superficie	Albedo (%)
Pasto verde	24
Arena blanca	67
Ladrillo rojo	24
Pasto seco	44
Nieve	85
Concreto	29

El albedo es una propiedad de la superficie que no es constante, al contrario depende fuertemente de las condiciones del cielo y de la longitud de la onda incidente.

La radiación proveniente del sol varía a cada segundo respecto de su composición espectral, así en cada momento del día y en distintas locaciones la radiación que alcanza la superficie terrestre es diferente.

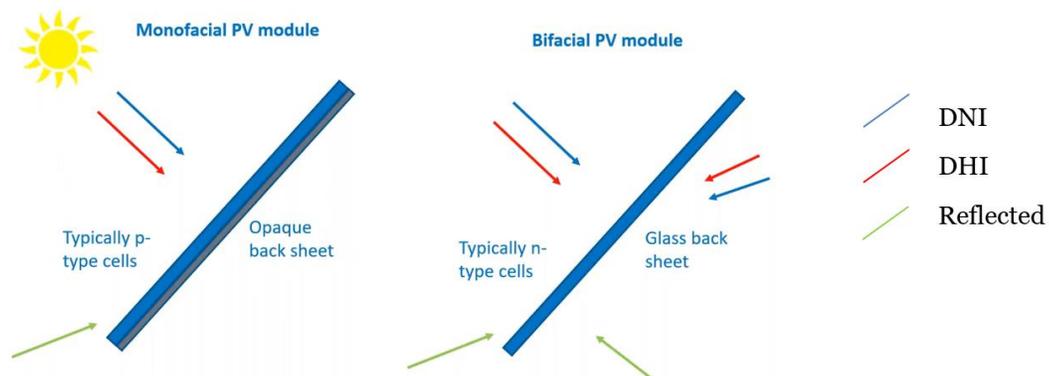


Figura 16. Análisis de la radiación para caso mono y bifacial.

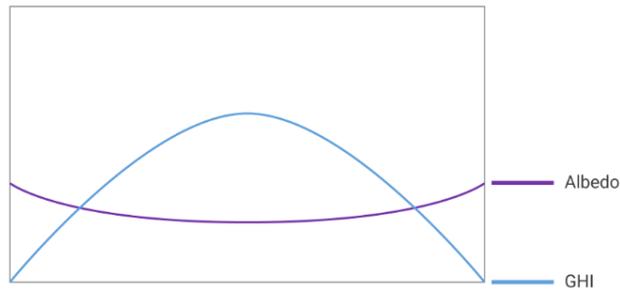


Figura 17. Relación entre albedo y radiación global horizontal (GHI) [39].

Junto con lo anterior, las características de reflectividad de cada suelo también varían de acuerdo con la longitud de onda de la onda incidente.

Debido a todo lo expuesto es que resulta necesaria una definición más precisa de albedo, el cual se denomina albedo espectral y demuestra de manera más exacta la forma en que la radiación incidente es reflejada para cada longitud de onda.

Las diferencias entre albedo efectivo y espectral para diversas superficies se encuentran en la Figura 17. En esta puede identificarse como la forma espectral del albedo generado por diversas superficies. Aquellas que reflejan en mayor medida las longitudes de absorción de los múltiples materiales empleados como sustratos de celdas solares presentan un albedo efectivo mayor. Esto es evidenciado para el caso particular del silicio, el cual queda expuesto en la Figura 18 bajo la forma del albedo ideal.

De manera general, el albedo efectivo ha sido utilizado de manera más recurrente para simular la operación de paneles bifaciales, sin embargo, en [38] se demuestra que al considerar el efecto del albedo espectral pueden encontrarse diferencias importantes en la potencia y rendimiento de la celda como los casos del estudio, donde fueron encontrados aumentos del 7,5% y 4,0% en la potencia de salida al considerar albedo espectral en lugar del efectivo para superficies de nieve y arena blanca respectivamente.

El fenómeno de albedo genera un aumento en la potencia producida por un panel desde que mayor energía proveniente de la radiación está alcanzando la cara trasera del dispositivo. Como fue mencionado anteriormente, la ganancia bifacial (GB) de un módulo es directamente proporcional al porcentaje de albedo generado por una superficie y, generalmente, este aporte se considera menor en épocas de invierno que en verano. Esto se explica por la configuración del cielo en ambos períodos; un cielo con más nubes generará una mayor componente de irradiancia horizontal difusa (DHI), la cual significa un aumento en la energía que alcanza efectivamente el suelo tras el panel.

Estudios más actuales, como el modelado bajo las condiciones de Ottawa, Canadá muestran que la ganancia bifacial se encuentra entre 13-35% en verano y 40-70% en invierno, dependiendo de la altura de instalación [40]. Por último, las distintas componentes de la radiación incidente interactúan de manera diferente con la superficie.

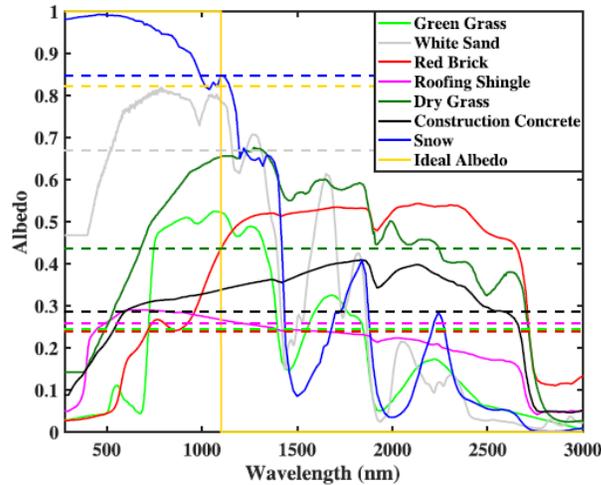


Figura 18. Albedo efectivo y espectral para distintas superficies.

### 3.1 Las Tecnologías

Desde el descubrimiento del efecto fotovoltaico en el año 1839 por el científico francés Edmond Becquerel, hasta la actualidad, han sido desarrolladas múltiples tecnologías de celdas solares fotovoltaicas.

En específico, la investigación relacionada a tecnologías bifaciales data de los años 1960 [41], pero no fue hasta 1977 cuando surgieron las primeras publicaciones sobre celdas bifaciales en el contexto de la Primera Conferencia de Energía solar Fotovoltaica Europea. En ese momento las celdas presentadas tenían una eficiencia no mayor al 7%, sin embargo, junto con el desarrollo de la tecnología, actualmente se han alcanzado importantes mejoras en este aspecto [42].

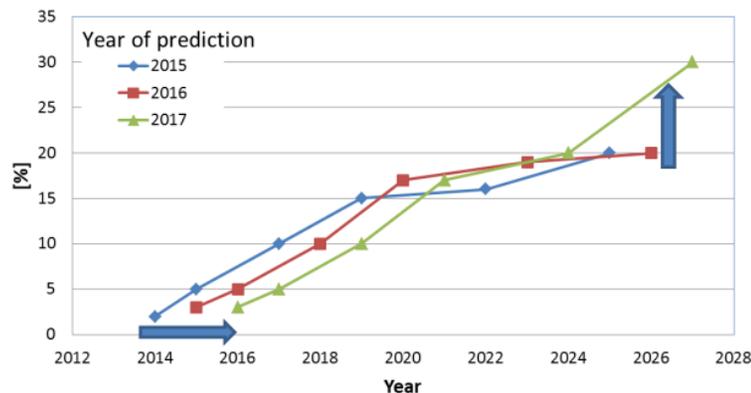


Figura 19. Predicción participación celdas bifaciales en el mercado PV por ITRPV [41].

De ahí en adelante, la investigación asociada a la tecnología bifacial comenzó a desarrollarse y en la década del 2010 comenzó a tener impacto comercial. Algunas compañías como Sanyo, Yingli Solar, PVG Solutions, bSolar, etc. comenzaron a comercializar módulos bifaciales, lo cual provocó que se generaran aplicaciones a gran escala.

Algunos ejemplos de importancia son:

- la planta PV bifacial de 1,35 MWp en Hokuto City, Japón, la cual reveló un aumento en la eficiencia de generación para el primer año de operación de 21,9% comparado con una planta monofacial de tamaño similar.
- Otros ejemplos de aplicación a gran escala son: La Hormiga en San Felipe, Chile (2015) y Golmud en China (2017), la cual corresponde a la mayor aplicación a nivel mundial con 71 MWp a la fecha [32].

Se espera que módulos bifaciales aumenten su importancia en el mercado global energético. El ITRPV - International Technology Roadmap for Photovoltaics - estima una presencia superior al 15% en el mercado para el año 2024. Otros estudios van más allá afirmando que la tecnología FV bifacial se está convirtiendo en la tecnología más promisoría para disminuir el costo de generación de la energía solar [43]

Actualmente, las distintas tecnologías de módulos bifaciales se han extendido, lo cual ha permitido reducir costos y mejorar características operacionales, alcanzando valores superiores al 95 % en bifacialidad y eficiencias del orden del 20% en la mayoría de estas.

Las principales tecnologías disponibles en la actualidad son presentadas a continuación, junto a una comparación de sus principales características.

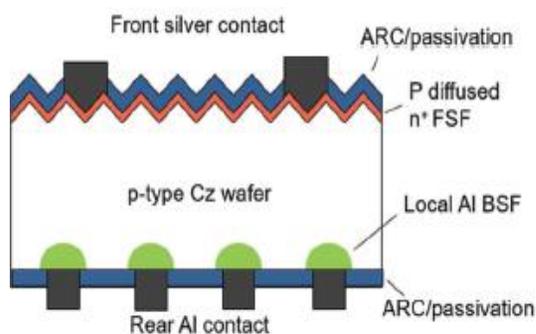


Figura 20. Esquema celda PERC

#### **Passivated Emitter Rear Contact (PERC):**

Tecnología introducida como bifacial desde el año 1996, proveniente de la configuración PERC monofacial, la cual se encuentra ampliamente disponible en el mercado PV debido a las ventajas que ofrece sobre la configuración más común Aluminium Backsurface Field (AL-BSF). Reducción en la temperatura de operación y aumento en la absorción de la radiación debido a la presencia de una capa dieléctrica pasiva, son algunas de los progresos obtenidos por esta tecnología [44].

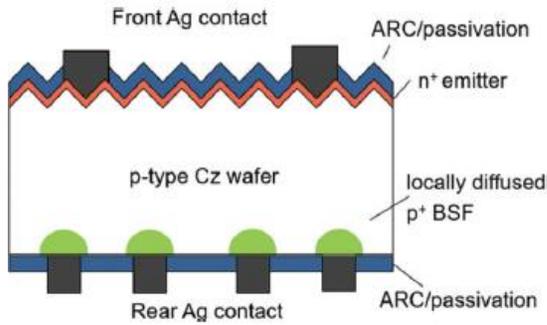


Figura 21. Esquema celda PERC

**Passivated Emitter and Rear Locally-diffused (PERL):** Esta tecnología emplea técnicas micro-electrónicas para alcanzar mayores más elevados de eficiencia. El costo asociado a las celdas PERC es considerablemente mayor que en celdas de silicio estándar y se emplean típicamente en autos solares o aplicaciones espaciales. La capa pasiva hace referencia a un óxido de alta calidad ubicado localmente sobre los contactos de la celda reduciendo significativamente pérdidas por recombinación y manteniendo buenas propiedades eléctricas en los contactos [45].

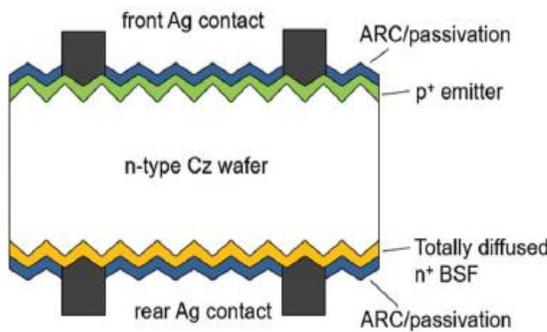


Figura 22. Esquema celda PERT

**Passivated Emitter Rear Totally-diffused (PERT):** Al igual que las configuraciones antes mencionadas, las celdas PERT presentan una capa pasiva que genera ventajas sobre las configuraciones más corrientes. En este caso, la capa se encuentra totalmente difundida sobre la cara posterior. Además, generalmente este tipo de celda presenta una base dopada tipo n, lo cual reduce el deterioro que exhiben las celdas con base dopada tipo-p [46]

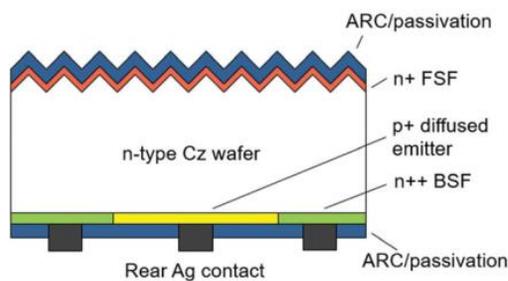
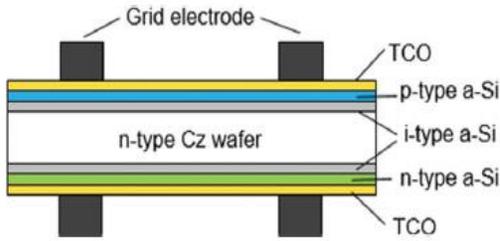


Figura 23. Esquema celda IBC

**Interdigitated Back Contact (IBC):** Al igual que las celdas PERT, la tecnología IBC presenta principalmente una base dopada tipo-n. Esta configuración no presenta contactos metálicos por su parte frontal. El desarrollo de esta tecnología ha sido impulsado por compañías como Bell Labs, ISC Konstanz y ECN.



**Heterojunction with Intrinsic Thin-layer (HIT):** Desarrollada primeramente por el grupo de investigación y desarrollo Sanyo en 1991 como monofacial e introducida como bifacial en el 2000, esta tecnología presenta preferentemente bases de silicio dopado tipo-n. Las principales características de estas celdas son la ausencia de un patrón de contactos frontales y la presencia de una heterojuntura, la cual corresponde a la interfaz entre dos regiones de semiconductores cristalinos diferentes, los cuales presentan distintas bandas energéticas.

Figura 24. Esquema celda HIT

Tabla 3. Principales tecnologías bifaciales PV y sus características [23]

Tecnología	Factor de bifacialidad	Eficiencia
PERC	~80 %	Cara frontal: 19,4-21,2 % Cara trasera: 16,7-18,1 %
PERL	≥89 %	Cara frontal: 19,8 %
PERT	≥85 %	Cara frontal: 19,5-22 % Cara trasera: 17-19 %
IBC	75 %	23,2 %
HIT	> 95 %	24,7 %

# Capítulo 4: Valle de Lluta

## 4.1. Contextualización

La actividad agrícola en la Región de Arica y Parinacota se desarrolla en pequeñas quebradas y valles costeros; entre los últimos destacan los valles de Lluta y Azapa. En ambos, se tienen condiciones climáticas similares y agua superficial disponible durante todo el año, sin embargo, cada uno presenta características propias que afectan, en diferente medida, su nivel de producción.

El valle de Lluta, en particular, corresponde a una salida natural del altiplano andino chileno hacia el mar y se encuentra ubicado al este de la capital regional, Arica. Su principal núcleo poblacional es la localidad de Poconchile, junto con otros pequeños caseríos de la zona. La superficie total del valle es de 7.606 hectáreas, de las cuales un 37% aproximadamente son utilizadas con fines agrícolas, siendo esta la principal actividad de la zona. Aun así, el desarrollo de esta actividad se ha caracterizado por pequeñas producciones, siendo siempre menor que las de su vecino valle de Azapa, además de una gran diferencia en los productos agrícolas generados en ambos valles. Al 2007 existían alrededor de 600 productores, de los cuales un 32% desarrollaba agricultura de subsistencia, un 45% corresponde a pequeños agricultores, 17% medianos y un 6% a grandes productores.

El valle se encuentra dividido en 3 sub-sectores principales:



Figura 25. Vista satelital Valle de Lluta.

1. Parte alta: comprende desde el sector de inicio de la actividad agrícola y riegos ubicado en Tocontase hasta el sector de Molinos pasando por la zona de Pata Elisa.
2. Parte media: esta parte abarca los sectores de El Tambo, Churina, Taipimarca, Linderos y Rosario, incluyendo la localidad más grande del sector llamada Poconchile. Se extiende desde el km. 21 al km. 41.
3. Parte baja: Desde la zona de Rosario (km. 21) hacia el poniente, llegando al inicio del camino internacional Carr. Internacional CH11, al norte de Arica.

De acuerdo con [47], las causas de las importantes diferencias en el nivel de producción entre los valles de Lluta y Azapa, radican en las características del suelo y el

agua que posee cada uno. El agua del río Lluta presenta una alta salinidad y concentración de boro superior a 11 ppm, mientras que el suelo mantiene esta salinidad y la presencia de boro, producto de las malas propiedades de drenaje y lixiviación. Estas características contrastan con la realidad del valle de Azapa, el cual presenta agua de mejor calidad y mejores suelos.

El río Lluta abarca una cuenca de 3378 km<sup>2</sup> [48], nace de las precipitaciones concentradas en el interior de la Cordillera de los Andes a una altitud entre 4000-5000 msnm y desemboca en el mar, por la zona norte de la ciudad de Arica. El agua proveniente del río Lluta contiene salinidad generada por altas concentraciones de sulfatos, cloruros y sodio soluble, junto con altas concentraciones de boro, que varían entre 9-29 mg/L a lo largo de su cauce. Estas características son heredadas de los afluentes que se encuentran en su curso superior, tales como el río Azufre y el río Colpitas, los cuales aportan concentraciones de elementos químicos tóxicos para las plantas. La calidad del agua se ve afectada por la presencia de distintos componentes que se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros y concentraciones del agua proveniente del río Lluta [47].

Parámetro	Parte alta	Parte media	Parte baja
pH	7,89	7,79	8,16
C.E. dS/m	2,2	3,22	5,5
Ca meq/L	6,98	9,75	20,24
Mg meq/L	2,39	4,41	8,46
Na meq/L	8,9	11,41	22,17
K meq/L	1,48	1,57	2,56
CO <sub>3</sub> meq/L	-	-	1,24
HCO <sub>3</sub> meq/L	1,88	1,65	1,57
Cl meq/L	12,00	15,05	31,13
SO <sub>4</sub> meq/L	7,35	10,92	21,3
Boro ppm	12,43	13,46	16,00
RAS	4,11	4,29	5,85
Na %	45,02	42,04	41,65
Clasificación	C3 - S1	C4 - S2	C4 - S2

Como puede observarse, el pH tiende a variar levemente y se mantiene casi constante a lo largo del recorrido. La concentración de boro, por otro lado, aumenta a medida que se está más próximo a la desembocadura del río. A pesar de lo anterior, se exhiben valores superiores a 12 ppm durante todo el trayecto. La tendencia se repite para la mayoría de los componentes como Mg, K, Ca, Na, Cl y SO<sub>4</sub>, lo cual afecta directamente en la clasificación del agua, la que cambia desde una clasificación C3-S1 a C4-S2 de acuerdo con la norma de Riverside presentada en la sección de Anexos. Lo anterior muestra una evolución negativa en la calidad del agua disponible para riego para los terrenos más próximos a la costa.

El uso del agua con fines de regadío lleva asociado, a su vez, un alto riesgo de salinización de los suelos. La disponibilidad para el uso de estos suelos está fuertemente impactada por la alta salinidad presente en el agua y en el mismo suelo, la presencia de boro en el agua de riego y problemas inherentes de drenaje interno de los suelos, los cuales amplifican el efecto de las limitantes mencionadas anteriormente e impiden la correcta

lixiviación de sales. Esto genera el alto porcentaje de tierras que actualmente no son aprovechables para el desarrollo de la actividad agrícola en la zona.

La actividad agrícola se ha orientado hacia el desarrollo de especies resistentes a la salinidad y a la alta radiación. Lo anterior determina que solo una variedad pequeña de cultivos pueda ser, efectivamente, desarrollados con éxito. Los principales productos provenientes de Lluta son el maíz (*Zea mais, amilaceo*) local denominado lluteño, variedades de cebolla (*Allium cepa L.*), tomate (*Lycopersicon esculentum Mill.*), alfalfa (*Medicago sativa L*) y betarraga (*Beta vulgaris*), sin embargo, estos se encuentran sujetos a variaciones dependiendo de las condiciones del mercado agrícola. Así, también es posible observar cultivos de berenjena (*Solanum melongena*), lechuga (*Lactuca sativa*) y brócoli (*Brassica oleracea botrytis*), entre otros.

Los componentes de sodio, cloro y boro afectan negativamente a las plantas, siendo el boro el factor más perjudicial de acuerdo con [47]. Las condiciones expuestas con anterioridad, además, generan que la producción se efectúe con rentabilidades muy bajas, lo cual incide negativamente en la posibilidad de incorporación de nuevas tecnologías para la solución de estas problemáticas. En general, existen iniciativas de apoyo y estudio como las impulsadas por el Nodo agrícola del valle de Lluta, el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y la Universidad de Tarapacá (UTA), entre otros.

#### **4.2. Levantamiento de información – visita al Valle de Lluta**

La visita al valle de Lluta se efectúa entre los días 09 y 14 de Septiembre del 2019. El objetivo principal de esta es complementar los conocimientos y estadísticas presentadas previamente en la sección 4.1, por medio de recorrer y conocer la zona de interés, establecer contacto con actores del área agrícola local y la identificación de problemáticas en conjunto con estos últimos. En términos generales, la visita cubre los siguientes tópicos: Caracterización del sector productivo actual e identificación de las principales problemáticas.



Figura 26. Visita a terreno y realización de encuestas a agricultores locales.

#### 4.2.1. Características sector agrícola

Por medio de la visita en terreno, es posible definir los principales cultivos y productos generados en el valle de Lluta para la fecha particular de la inspección. De acuerdo con lo observado en sitio, estos corresponden, en orden decreciente de importancia a:

- Cebolla
- Maíz Lluteño
- Alfalfa
- Berenjena



Figura 27. Cultivos identificados en la visita a terreno. Arriba: Berenjena (izq.) y cebolla (der.). Abajo: maíz Lluteño (izq.) y alfalfa (der.).

#### 4.2.2. Problemáticas

Durante las fechas mencionadas, se realizan entrevistas a seis diferentes trabajadores agrícolas. Los datos de cada uno son presentados en la tabla que sigue:

Tabla 5. Datos agricultores entrevistados.

Nombre	Antigüedad (años)	Ubicación	Latitud	Longitud
Edgar Salvador	03	km. 29	18°26'52.10"S	70°03'11.74" W
Marcos Mamani	21	km. 10	18°24'45.71"S	70°11'27.83" W
Ángel Álvarez	10	km. 23	18°26'35.18"S	70°05'40.58" W
Izzamar Cayo	26	km. 03	18°25'06.88"S	70°14'09.76" W
Eloy Quispe	10	km. 29	18°26'54.25"S	70°03'16.76" W
Kenny Blanco	10	km. 27	18°26'46.87"S	70°04'18.17" W

La mencionada encuesta tiene por principal objetivo registrar la opinión de los agricultores de la zona respecto del nivel de impacto que las problemáticas identificadas, tanto en documentos oficiales como en terreno, generan sobre su actividad y sus productos. Para ello, se consulta a cada entrevistado sobre el efecto que perciben sobre el desarrollo de sus actividades con respecto a las siguientes problemáticas:

- Alta radiación solar
- Baja calidad del agua
- Mala calidad de la tierra
- Escaso acceso a electricidad
- Limitada disponibilidad del agua.

A cada una de estas se le asigna un valor entre 1 y 5 donde 5 representa el mayor nivel de impacto. De acuerdo con los resultados expuestos en la Tabla 6, se logra identificar que el principal problema seleccionado por las personas de la zona corresponde a la alta radiación solar, la cual genera condiciones adversas para los cultivos. Según declaraciones de los mismos agricultores, muchas especies simplemente no soportan los niveles de radiación, haciendo que la oferta de la zona tenga una escasa variedad de productos. Al mismo tiempo, esta problemática genera la necesidad de tener un sistema de riego constante, ya que la vida de los cultivos se reduce considerablemente en ausencia de un suministro regular de agua.

Tabla 6. Resultados nivel de impacto de problemáticas según agricultores locales.

Problemática	E. Salvador	M. Mamani	A. Álvarez	I. Cayo	E. Quispe	K. Blanco	TOTAL
Radiación	3	5	5	2	4	5	24
Calidad agua	3	5	3	1	3	4	19
Calidad tierra	1	3	3	3	1	1	12
Acceso electricidad	1	1	3	1	1	1	8
Disponibilidad agua	1	1	2	1	1	2	8

En segundo y tercer lugar, se encuentran los temas referentes a la calidad del agua utilizada para irrigación de cultivos y del suelo disponible para los mismos, los cuales también fueron identificados y descritos en la sección previa.

## **Capítulo 5: Estimación del albedo**

La estimación del albedo generado en el valle de Lluta se lleva a cabo mediante 4 etapas, las que se describen como sigue:

1. Se seleccionan dos superficies representativas de los suelos presentes en el valle de Lluta. Estas son escogidas en base a los cultivos de mayor aplicación y consideran las técnicas empleadas para su respectivo manejo.
2. Se determina el comportamiento reflectivo de cada componente de las mencionadas superficies. Debido a los alcances de este trabajo, algunos componentes son desarrollados con mayor detalle que otros.
3. Se define el impacto efectivo de cada componente sobre la radiación alcanzada en la cara posterior de los módulos fotovoltaicos. Este impacto depende de la posición y se expresa por medio del factor de visión.
4. Finalmente, se combinan los efectos anteriores para la obtención del albedo local para las dos superficies representativas seleccionadas.

### **5.1. Etapa 1: Selección de suelos representativos**

El trabajo de estimación de albedo se centra sobre dos superficies representativas. Para esto, son considerados factores como la locación de estos suelos, el recurso solar presente en la zona, la disposición de sus cultivos, el manejo empleado y las características de sus componentes. La combinación de todas estas variables permite, posteriormente, estimar de buena manera las propiedades de reflexión de cada superficie.

Los suelos representativos son definidos principalmente en base a los cultivos de mayor aplicación en el Valle de Lluta, presentados en la sección 4.2. Así, la evaluación se reduce a dos superficies representativas identificadas para la zona: cebolla y berenjena.

El cultivo de cebolla es incorporado en este trabajo debido a su amplia aplicación en la agricultura del valle, siendo el principal producto generado en la zona. La berenjena, a pesar de presentar niveles productivos menores al de cebollas y maíz Lluteño, posee especial interés debido a la utilización de plásticos agrícolas dentro de sus técnicas de manejo, lo cual agrega al estudio la posibilidad de comparación de superficies representativas diferentes, con componentes que presentan un alto potencial para la generación de albedo.

El maíz Lluteño y la alfalfa no resultan de interés para este estudio. El maíz, en particular se descarta debido a la altura que alcanza durante su etapa de crecimiento, muchas veces superior a los 3 metros. Lo anterior, sumado al espacio requerido para la correcta realización de actividades de mantenimiento y operación, resulta en un alto nivel de restricciones y elevan la inversión inicial. La alfalfa, por otro lado, se excluye ya que no se identifican técnicas de cultivo bien definidas lo cual dificulta su caracterización.

#### **5.1.1. Cultivo de cebollas**

En el caso de cebollas, se toman como referencia los cultivos desarrollados por la agricultora local Izzamar Cayo. La especie seleccionada corresponde a cebolla Century, una de las principales cepas utilizadas en la zona de acuerdo con [49], la cual alcanza un

diámetro de bulbo promedio de entre 84 y 86 mm [50] antes de ser cosechada. La planta no excede en envergadura al bulbo, el cual en consecuencia funciona como un buen parámetro estimativo del diámetro total de la planta.

La técnica de siembra y riego corresponde a la disposición de surcos, tal como se muestra en la Figura 28. Estos surcos varían en extensión, encontrándose generalmente dentro del rango entre 10 y 30 m de largo. Entre los surcos, son cultivadas dos hileras de cebollas, distanciadas entre ellas por 10 cm aproximadamente.



Figura 28. Cultivos de cebolla en el valle de Lluta.

La plantación se encuentra emplazada en el km. 03 de la zona baja del valle de Lluta, específicamente en las coordenadas  $18^{\circ}25'07''$  (-18,42) de latitud Sur y  $70^{\circ}14'10''$  (-70,24) de longitud Oeste.

La cebolla desarrollada en el Valle de Lluta pasa por distintas etapas antes de su cosecha final y posterior comercialización. En primer lugar, las semillas son plantadas en

terrenos controlados formando el almácigo del producto. Una vez que este se encuentra en condiciones adecuadas (i.e altura, número de hojas, diámetro de bulbo y de cuello [50]) la planta es trasplantada al terreno definitivo, donde permanece en crecimiento por aproximadamente 4 meses hasta su cosecha.

En el sector bajo del valle de Lluta, es posible realizar dos cosechas al año. Esta distribución de actividades permite reservar un período del año para el descanso de los suelos, actividad recomendada y practicada por los agricultores locales. De acuerdo con la información entregada por Izzamar Cayo, durante el año 2019 las actividades fueron desarrolladas como se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Calendario anual simplificado cultivo de cebollas.

Actividad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Descanso												
Crecimiento												
Cosecha												

### 5.1.2. Cultivo de berenjenas

El cultivo de berenjenas ha tomado mayor importancia en el último tiempo, a pesar de siempre haber correspondido a uno de los productos característicos del valle de Lluta. Este cultivo tiene la particularidad de utilizar plásticos agrícolas dentro de sus técnicas de plantación y manejo, lo cual lo hace especialmente atractivo para la evaluación de albedo y su consecuente impacto sobre el panel bifacial. La disposición espacial de los cultivos también es guiada por los surcos de riego. Debido al mayor tamaño de la berenjena en comparación con la cebolla, solo es plantada una hilera de estas entre los surcos con una separación de 40 cm aproximadamente entre ellas. La planta de la berenjena puede alcanzar hasta 1 m de altura, mientras que su envergadura en Lluta llega aproximadamente a los 30 cm.

Para este estudio se utilizan los datos entregados por los agricultores locales Dante Mamani y Edgar Salvador, quienes cuentan actualmente con cultivos de berenjena en la zona. Las figuras expuestas abajo corresponden a las plantaciones desarrolladas por Edgar Salvador, cuyo terreno se emplaza en las coordenadas 18°26'52" (18,45) de latitud Sur y 70°03'12" (70,05) de longitud Oeste. La especie plantada corresponde a la berenjena Sharapova, la cual de acuerdo con los agricultores locales, resulta muy productiva en condiciones de baja luminosidad, lo cual aporta interés a su potencial desarrollo bajo sistemas agrovoltaicos.

El proceso de cultivo de la berenjena es bastante similar al descrito por Izzamar Cayo para el caso de cebollas. Las actividades desarrolladas comúnmente, descritas de una manera general y aproximada, se detallan en la Tabla 8.



Figura 29. Cultivos de berenjenas en el valle de Lluta.

Tabla 8. Calendario anual simplificado cultivo de berenjenas.

Actividad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Descanso												
CreCIMIENTO												
Cosecha												

### 5.1.3. Definición de suelos representativos

Finalmente, a partir de la información obtenida para los cultivos de cebolla y berenjena, las superficies representativas son definidas. En primer lugar, se presenta una tabla resumen con la información más importante referente a los cultivos seleccionados.

Tabla 9. Resumen principales características cultivos cebolla y berenjena.

	<b>Cebolla</b>	<b>Berenjena</b>
Agricultor	Izzamar Cayo	Edgar Salvador
Latitud	18°25'07"	18°26'52"
Longitud	70°14'10"	70°03'12"
Especie	Century	Sharapova
Envergadura planta	<8,6 cm	<30 cm

Las superficies representativas que son utilizadas para la estimación de albedo se componen de configuraciones simplificadas en base a lo evidenciado durante la visita en terreno y a los datos de disposición espacial suministrados por los agricultores locales. Las configuraciones a estudiar y el detalle de sus medidas se presentan a continuación.

La Figura 30 muestra la representación generada para el cultivo de cebollas, el cual consiste en una disposición por hileras de pares de cebollas de igual tamaño sobre el suelo desnudo. El caso de berenjenas, mostrado en Figura 31 se compone también de hileras, posicionadas sobre plásticos agrícolas. Además, entre cada film plástico existe una delgada separación de tierra.

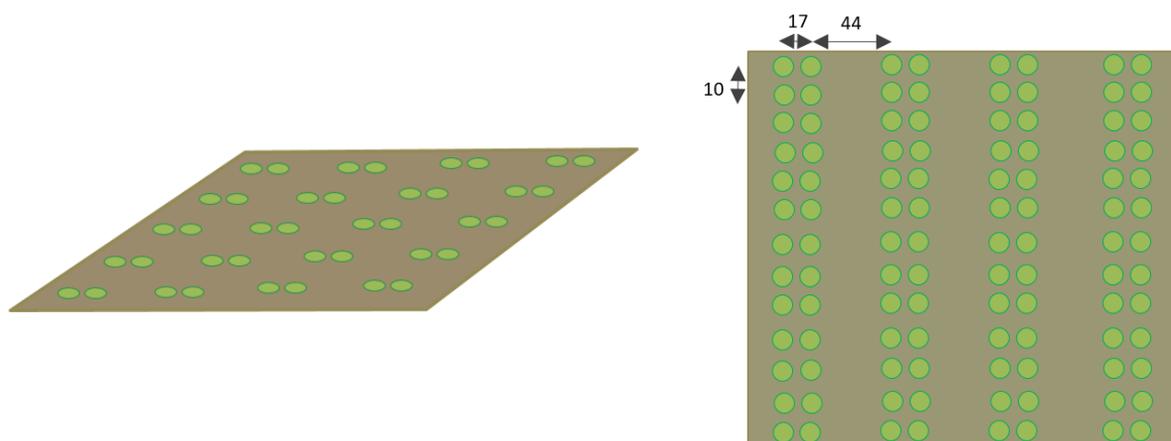


Figura 30. Superficie representativa de cebollas (medidas en cm.)

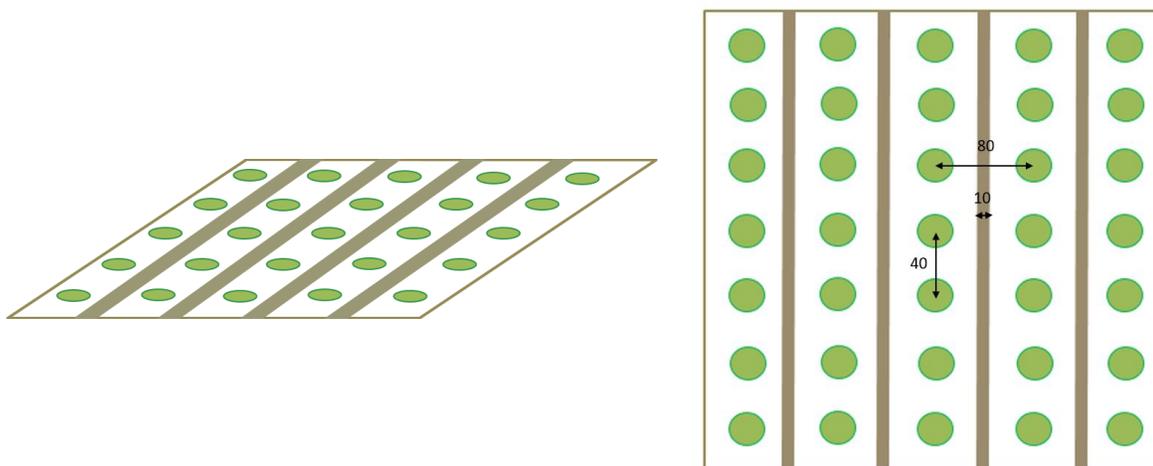


Figura 31. Superficie representativa de berenjenas (medidas en cm.).

Estas configuraciones evolucionan en el tiempo de acuerdo a lo expuesto en las Tabla 7 y Tabla 8. Así, por ejemplo, en enero la superficie de cebolla se compone únicamente de tierra desnuda, mientras que en junio, las cebollas se encuentran en su máximo tamaño de 8 cm de diámetro.

Resulta importante destacar que estas representaciones no incluyen el factor de la variación en altura de los cultivos.

## 5.2. Etapa 2: Albedo generado por cada componente

De los suelos representativos seleccionados previamente, se identifican tres componentes básicos. Estos son:

- Planta (producto agrícola y biomasa)
- Suelo desnudo
- Plástico agrícola

Para cada uno de estos componentes, se busca predecir el albedo generado para diferentes condiciones de cielo. Estos valores son posteriormente utilizados para la evaluación del desempeño del sistema bifacial.

En el caso del suelo desnudo y de los plásticos agrícolas, se establece un modelo estimador de albedo definido en base a datos medidos en terreno. Este proceso es discutido en detalle en la sección 5.2.1. El caso del producto agrícola y la planta es diferente. Dada la imposibilidad de realizar mediciones sobre estos productos, el albedo generado por la componente planta es aproximado de igual manera para los casos de cultivos de cebollas y berenjenas.

Por simplicidad, ambos son establecidos como superficies circulares de características reflectoras iguales a las del pasto verde presentadas en la sección 3.1 (albedo=24%). Este importante supuesto corresponde a la potencial mayor fuente de incertidumbre del presente estudio y debe ser incorporado en los resultados finales.

### 5.2.1. Medición de albedo

En esta sección se presenta el proceso realizado para la medición del albedo generado por las superficies de interés. En particular, se evalúa el albedo producido por el plástico agrícola y el suelo desnudo.

#### *Objetivo del experimento*

Este procedimiento tiene por objetivo la obtención de medidas empíricas de los valores de albedo generados por el plástico de uso agrícola y por el suelo desnudo de la zona. Estas medidas son obtenidas por medio de un montaje experimental especialmente diseñado para capturar la radiación reflejada por cada superficie, el cual es detallado posteriormente.

#### *Ubicación*



Figura 32. Ubicación PFV El Águila

El proceso de medición se lleva a cabo en las instalaciones de la planta fotovoltaica El Águila, perteneciente a la empresa ENGIE Energía Chile y ubicada al este de la ciudad de Arica, a menos de 10 km de distancia del Valle de Lluta.



Figura 33. Banco de pruebas bifacial (izq.) y ubicación zona de pruebas de albedo (der.)

En estas instalaciones, Laborelec cuenta con un banco de pruebas de tecnologías fotovoltaicas bifaciales, inaugurado en noviembre del año 2017. En el lugar se monitorea constantemente el desempeño de distintas tecnologías de módulos bifaciales instaladas sobre estructuras fijas y mecanismo de seguimiento del Sol. Además, se cuenta con equipos avanzados para monitorear las condiciones meteorológicas de la zona, junto con su influencia en la generación eléctrica. La locación específica de la instalación experimental de este estudio corresponde a la zona destacada de color naranja en la Figura 33.

Las principales características del material plástico testeado son presentadas en la Tabla 10. Además, la ficha técnica del mismo se encuentra disponible en la sección de Anexos.

Tabla 10. Datos generales plástico agrícola.

Polietileno Blanco Laminado

<p>Espesor: 35 <math>\mu\text{m}</math>                      Color: Blanco                      Extra: Protección anti-UV                      Durabilidad radiación UV: 1 temporada                      Uso: Mulch e invernaderos</p>

Tabla 11. Equipos y materiales para el montaje.

Equipos	Materiales
5 piranómetros modelo CMP10 de la marca Kipp&Zonen.	4 apoyos de hormigón.
1 Datalogger modelo CR1000X de la marca CAMPBELL SCIENTIFIC	Cable de acero
1 batería Campbell SCIENTIFIC PS 200 de 12 V con regulador de potencia	Tensores
1 celda solar portatil	Soportes varios

### *Montaje e instalación*

El montaje experimental consiste en una superficie horizontal dividida en 4 áreas cuadradas de 7m x 7m, cada una cubierta por un material de interés o en su defecto, sin cobertura alguna en el caso del suelo desnudo. Para fines de este trabajo, solo el suelo desnudo y el plástico agrícola son de interés, las otras dos superficies son parte del montaje, pero su inclusión responde a motivaciones diferentes de Laborelec.

Así, el plástico agrícola Polietileno Blanco Laminado es instalado en la dirección Nor-Este y la tierra desnuda en la posición Nor-Oeste. El film plástico entregado por el proveedor es fijado sobre un armazón de madera para evitar problemas asociados con el viento presente en la zona. Este proceso puede observarse en la Figura 34.

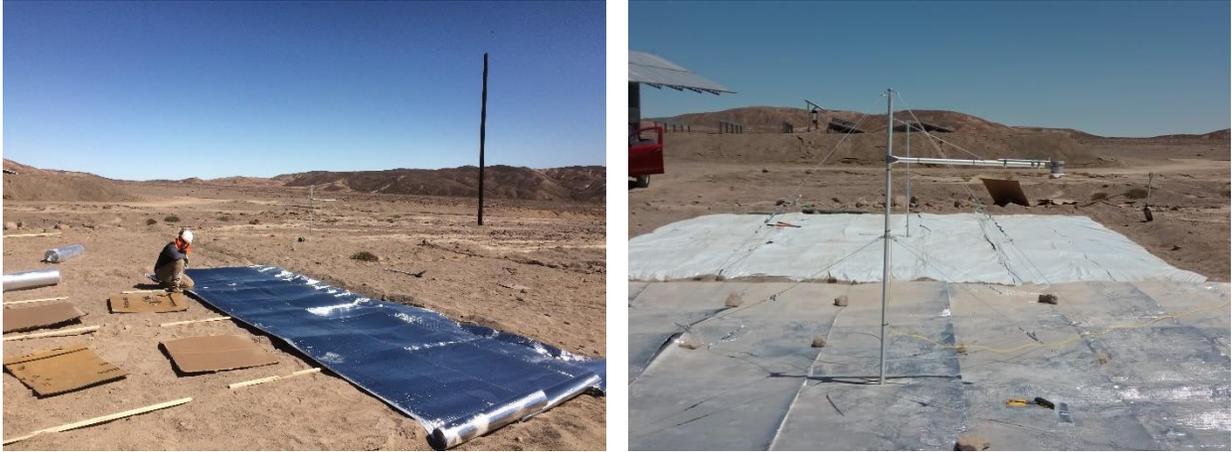


Figura 34. Instalación plásticos (izq.) y estructura para la medición de albedo (der.).

En el punto centro de cada subdivisión del terreno se dispone una estructura para realizar las mediciones. Los materiales y componentes de las estructuras son detallados en la Tabla 11. Esta estructura se compone de una barra vertical principal, asegurada al suelo por medio de 8 tensores y cables de acero unidos a bloques de hormigón que ayudan a mantenerla en la posición correcta ante condiciones de viento u otros posibles inconvenientes.

Una segunda barra horizontal se acopla a la principal. En el extremo libre de esta se instala el piranómetro orientado hacia abajo, con la finalidad de capturar la radiación reflejada por el suelo. En el caso del sector cubierto únicamente con tierra, un piranómetro adicional es montado orientado hacia arriba, el cual mide la radiación incidente en el lugar y sirve como referencia para el cálculo del albedo de todas las superficies. En esta etapa resulta importante la correcta orientación de los equipos de medición para la validación de los datos generados. Debido a esto, se toma especial atención en la colocación de las barras y de los piranómetros, los cuales cuentan con un sistema nivelador incorporado para determinar su correcta inclinación.



Figura 35. Esquema ubicación de las superficies (izq.) y vista final de la instalación (der.).

### *Toma de datos*

El proceso de captura y almacenamiento de datos comienza por los piranómetros, los que capturan la radiación incidente desde el Sol y/o reflejada por otros cuerpos. Estos equipos cuentan con un espectro de absorción del rango entre 285-2800 nm, siendo este mayor al espectro de la radiación solar. La ficha técnica del piranómetro *CMP10 Kipp&Zonen* se encuentra disponible en Anexos. La información recopilada por estos dispositivos es enviada por medio de señales hacia el equipo registrador de datos electrónico –*Datalogger*-. Este último interpreta las señales recibidas y entrega los valores de radiación medida cada minuto.

El sistema *Datalogger*, de manera adicional, entrega el registro de la temperatura del equipo y del nivel de batería. Este montaje es energizado por una celda solar portátil, el cual alimenta una batería de 12 V con regulador de carga, como se muestra en la Figura 36.

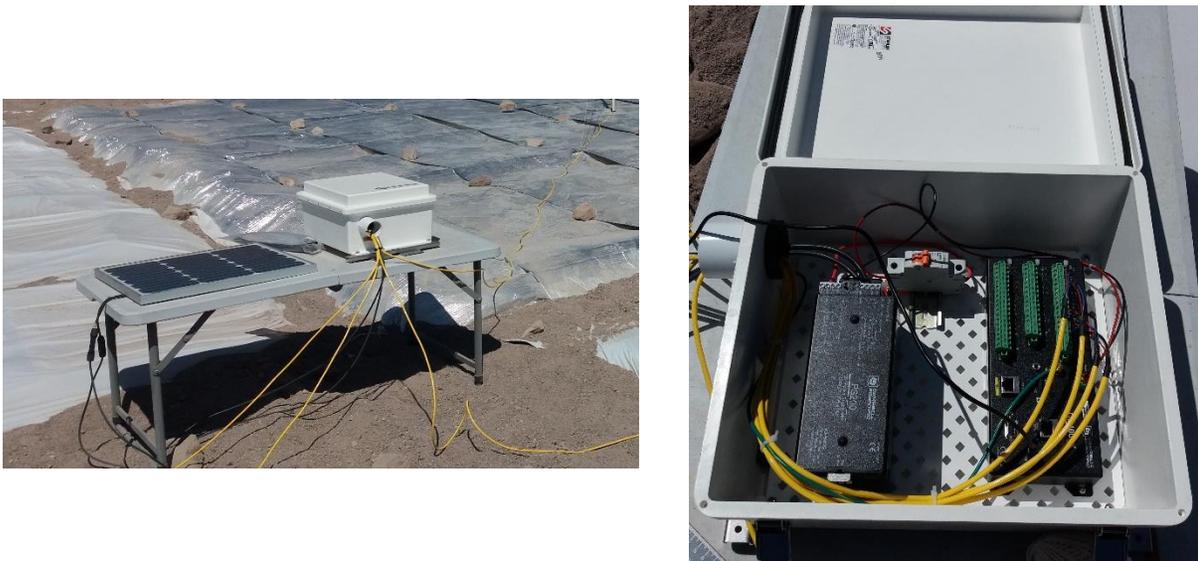


Figura 36. Instalación Datalogger y baterías.

### *Resultados*

Los resultados obtenidos por medio del montaje experimental instalado en la PFV El Águila corresponden a datos de Radiación Global Horizontal (GHI) y la Radiación Reflejada Horizontal (RHI) registrados por cada minuto para cada una de las 2 superficies desde el día 28 de septiembre hasta el 11 de diciembre del año 2019, equivalente a un total de 75 días y más de 108000 datos recopilados.

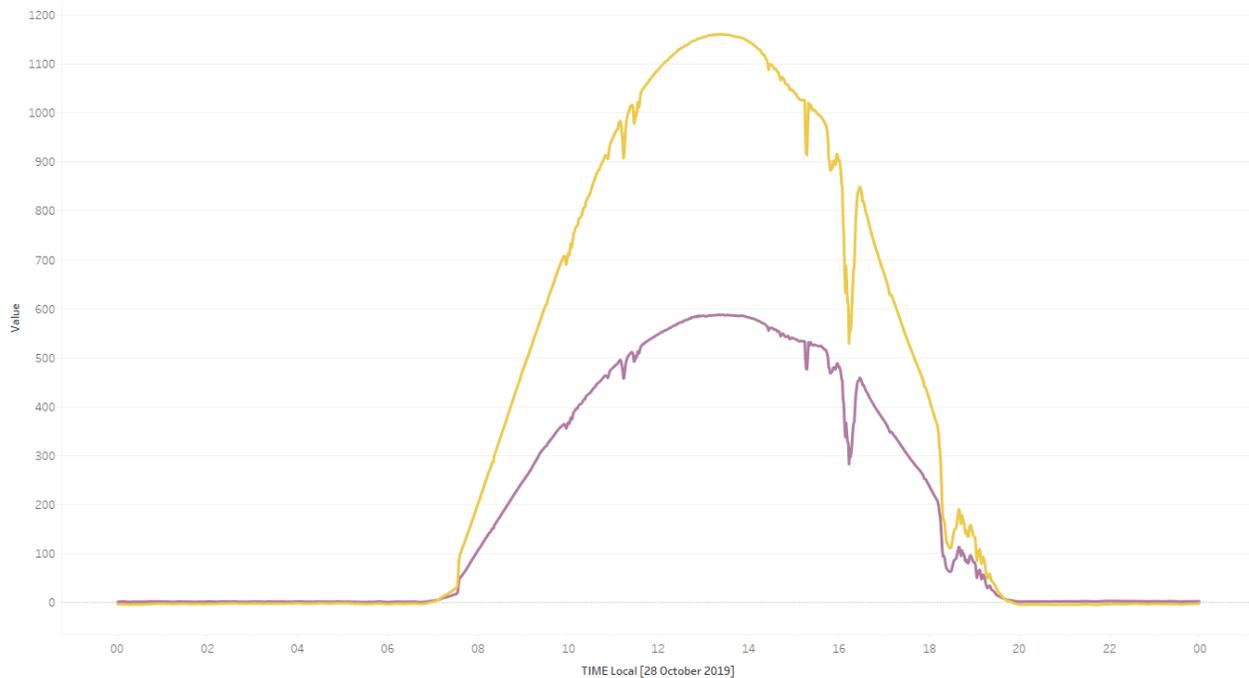


Figura 37. GHI y RHI registrados para el día 28 de octubre (caso plástico agrícola)

Aquí, resulta posible obtener los gráficos diarios comparativos de las curvas GHI y RHI para cada superficie. La Figura 37, en particular, muestra el caso para el día 28 de octubre del plástico agrícola. En estos puede notarse como evoluciona la radiación reflejada con respecto a la incidente, siendo ambas muy similares al comienzo y al final del día y diferentes a medida se acerca el mediodía solar.

El albedo instantáneo se obtiene como el cociente entre RHI y GHI por cada unidad de tiempo. Como se muestra en la Figura 38, este valor se mantiene constante durante casi todo el día a excepción de los extremos, donde su valor crece de manera muy acelerada. Este efecto se debe a que en esos momentos del día el ángulo de incidencia de la radiación solar es muy bajo, lo cual favorece la reflexión de esta sobre las distintas superficies.

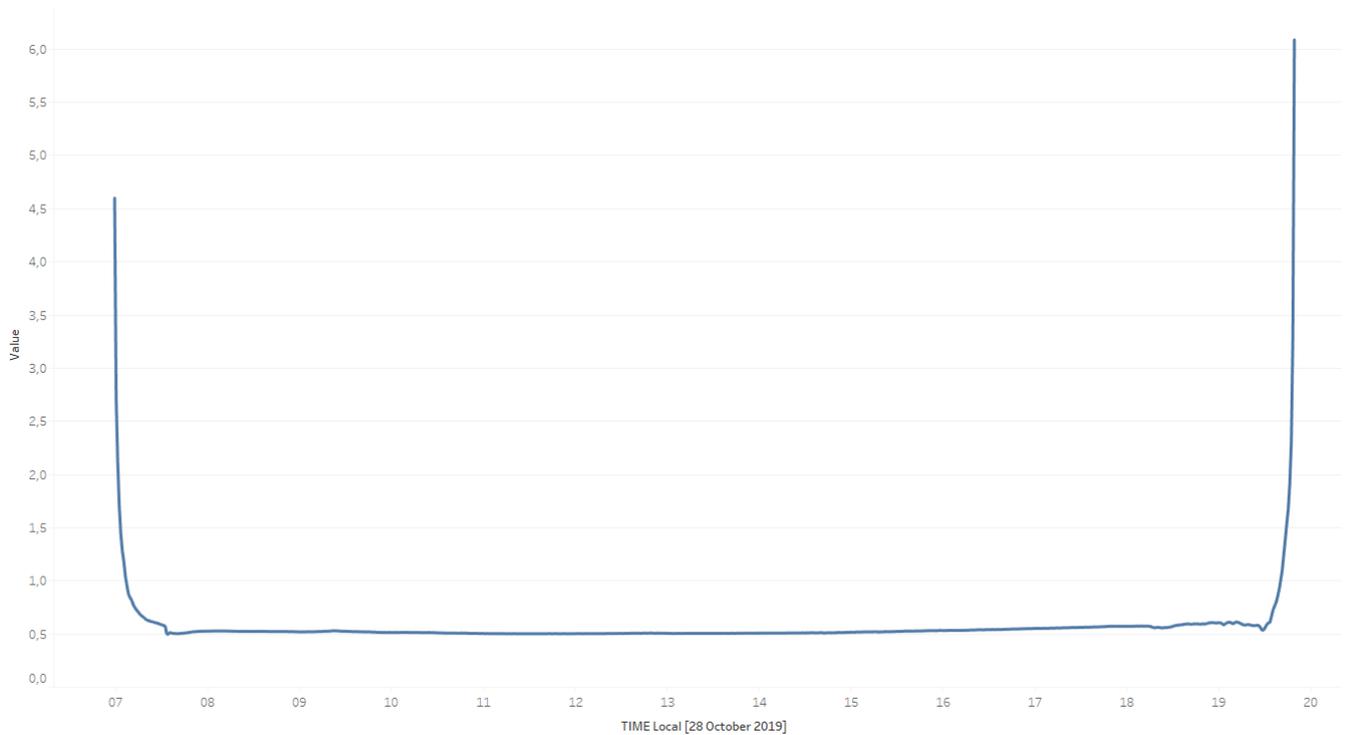


Figura 38. Albedo instantáneo registrado para el día 28 de octubre (caso plástico agrícola)

De manera sencilla, resulta útil representar el albedo medido de acuerdo a su valores diarios, a fin de poder observar su evolución a lo largo de períodos mayores. Para esto, se desea evitar el efecto generado en el inicio y final del día, momento en que se genera un alto valor de albedo pero con un bajo aporte energético real. Es así como se escoge la medida de albedo normalizado como valor comparativo, el cual consiste en el valor de la radiación reflejada ponderada por el valor de la radiación incidente correspondiente y normalizado por el valor acumulado diario de la radiación GHI.

$$\alpha_{normalizado} = \frac{RHI_t GHI_t}{\sum_t GHI} \quad 4.$$

En el gráfico presentado en la Figura 39, se comparan los valores de albedo instantáneo y albedo normalizado para cada día de medición.

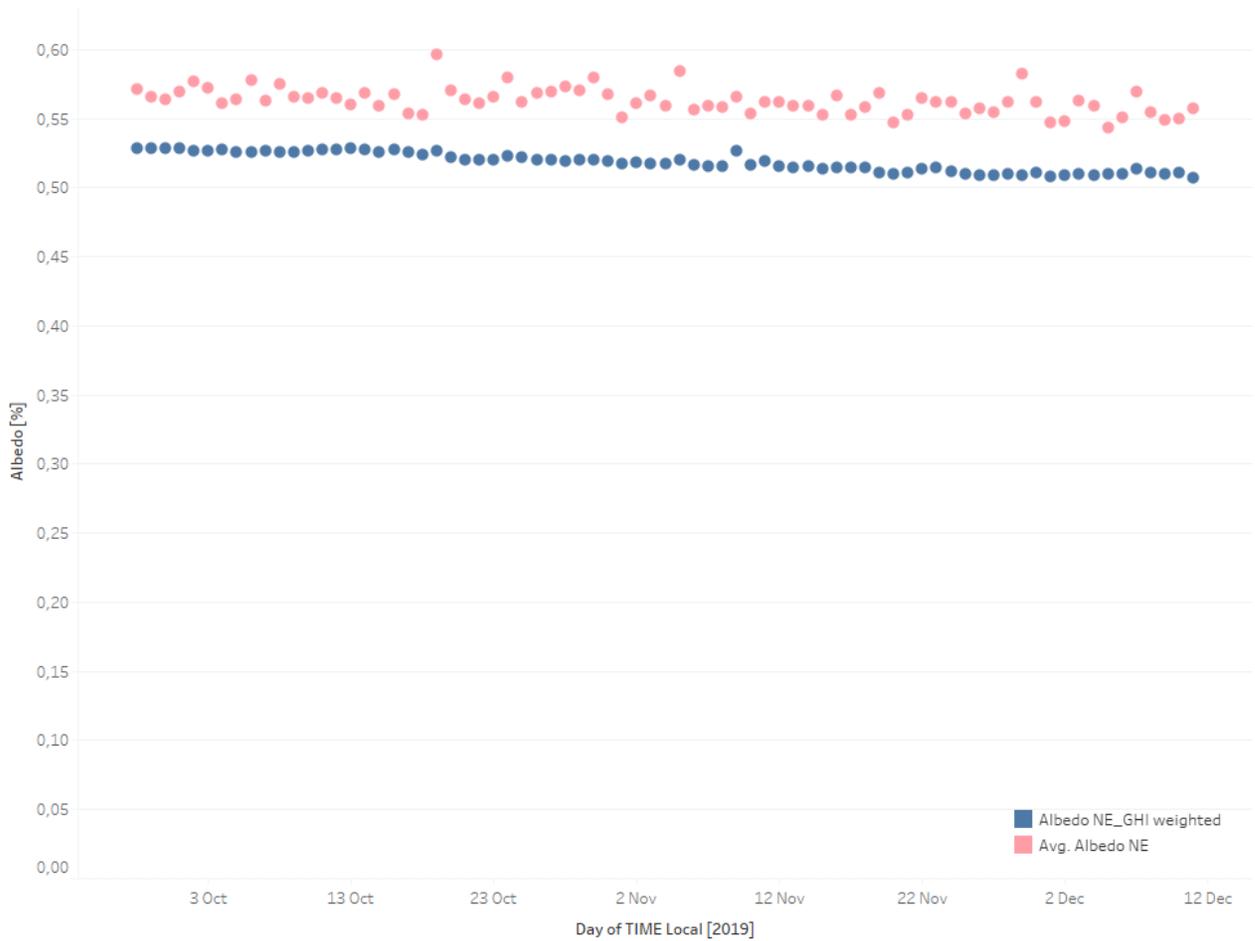


Figura 39. Comparación albedo normalizado (rosa) e instantáneo (azul) para el plástico agrícola.

Aquí, se obtiene que el albedo corregido corresponde a entre un 87,4 y 95 % de los valores de albedo instantáneo diario. Esta disminución de los valores se debe a la menor influencia de los altos valores de albedo generados en momentos de baja elevación solar. De todas formas, se prefiere el parámetro de albedo corregido ya que no se ve alterado por estos valores de escaso aporte energético.

Finalmente, los valores resultantes de albedo normalizado para las 2 superficies de interés son presentados de manera diaria en la Figura 40.

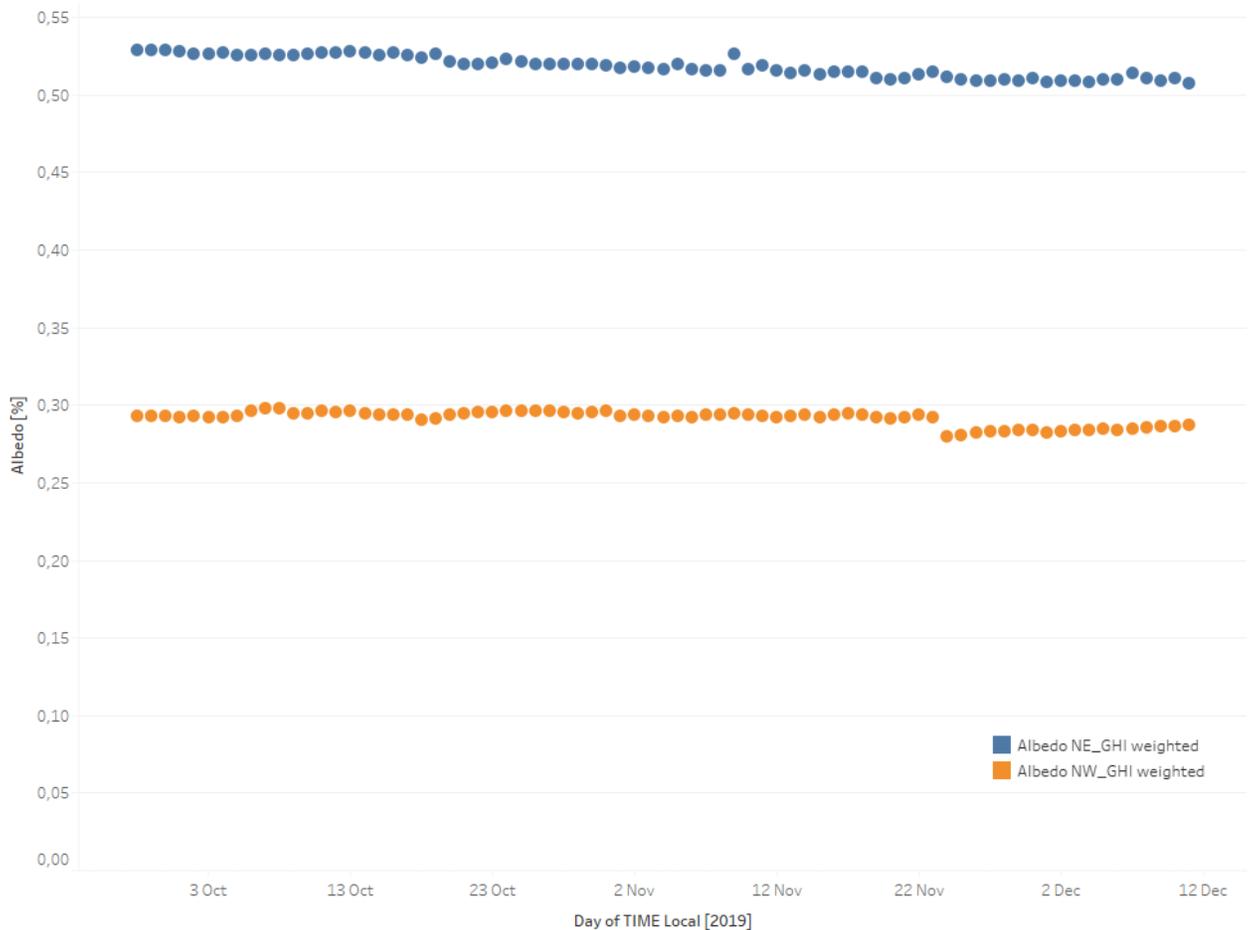


Figura 40. Albedos normalizados diarios para el plástico agrícola (azul) y la tierra (naranja).

De manera clara, el plástico agrícola es capaz de generar una reflexión de la radiación incidente significativamente mayor que el caso de la tierra desnuda. Con respecto a la Figura 40, destacan los siguientes puntos:

1. El albedo corregido registrado para la tierra se encuentra, entre el 28 y 30%, ubicándose cercano a los valores registrados para el concreto (29%) en la literatura. Lo anterior se considera adecuado dada la similitud visual de este con la tierra desértica de la PFV El Águila, a pesar de corresponder a una estimación y comparación muy general.
2. Al tomar todo el periodo de medición (29/09-11/12), el albedo corregido generado por el plástico de uso agrícola se mantiene entre 50% y 54%, encontrándose entre los valores declarados en la literatura para el pasto seco (44%) y arena blanca (67%). Lo anterior también parece adecuado considerando las características visuales de los materiales. De todas formas deben ser considerados las posibles diferencias en los métodos experimentales y las condiciones de recurso solar en cada área de medición.
3. Como una manera de comparación entre ambos materiales, si se consideran exclusivamente los valores promediados diarios de albedo corregidos por GHI, las

siguientes cifras son obtenidas: Plástico=51,83% y Tierra= 29,14%. En conclusión, el plástico agrícola refleja un 22,69% más de radiación incidente que lo correspondiente al suelo desnudo.

4. El albedo presentado por el plástico agrícola presenta un decrecimiento durante el tiempo de medición. Este efecto se asocia a la acumulación progresiva de tierra sobre el material y a una posible degradación propia del plástico debido a la acción de la radiación solar. La acumulación de polvo -o soiling- no es controlada ni intervenida, con la finalidad de entregar al estudio características de operación real. La degradación del material, y la consecuente pérdida de sus propiedades, es un efecto ya conocido, tanto así que los agricultores locales tienden a reemplazar los films plásticos cada una o dos temporadas.

A pesar de lo anterior, el comportamiento detallado de esta degradación no se encuentra definido y su determinación no se incluye dentro de los alcances de este trabajo. En particular, el plástico evidencia un decrecimiento desde 53,79% a 50,70% correspondiendo estos a los valores inicial y final así como al máximo y mínimo del proceso de medición. Lo cual se traduce en un decrecimiento del 5,7% del valor inicial. La tierra por otro lado, muestra un comportamiento más variado, asociando estas variaciones a condiciones propias de humedad, temperatura y demás propiedades.

5. Resulta importante evidenciar que pueden existir errores en los valores obtenidos debido a potenciales efectos cruzados entre los distintos materiales. Es posible que la radiación reflejada por alguna superficie alcance no solo el piranómetro sobre esta, sino también los contiguos, afectando así las mediciones registradas. Para controlar este efecto debe definirse la correcta altura de instalación del piranómetro, en función del área efectivamente cubierta y las limitaciones propias del equipo. La configuración ideal no fue desarrollada en este estudio y es propuesta como punto a mejorar.

### 5.2.2. Modelo estimador de radiación reflejada

En esta sección se procuran encontrar modelos de predicción de la reflexión generada por cada una de las superficies en base a los datos experimentales obtenidos. Para esto se propone una función con ciertas variables independientes que potencialmente afectan sobre el fenómeno de reflexión que experimenta cada componente. La relación de estas variables con los valores de radiación reflejada es evaluada posteriormente.

Así, en primer lugar, se propone que la radiación reflejada por cada componente depende directamente de ciertos parámetros, expresada de la siguiente manera:

$$RHI_s = f_s(AZI, \zeta, GHI) \quad 5.$$

Donde,

- $RHI_s$ : valor estimado de la radiación reflejada por cada superficie.
- $GHI$ : radiación global horizontal medida en terreno.
- $AZI$ : ángulo azimutal solar.
- $\zeta$ : ángulo cenital.

Los datos obtenidos mediante el proceso de medición corresponden a valores por cada minuto de la radiación global horizontal incidente (GHI) y de las porciones reflejadas por cada superficie (RHI) de acuerdo al tiempo universal coordinado (UTC). Para poder trabajar los datos de buena manera y obtener los ángulos requeridos resulta necesario identificar las mediciones con respecto al Tiempo Solar Local (LST).

Este concepto corresponde a la medición del paso del tiempo con respecto a la posición del Sol en el cielo, correspondiendo el mediodía solar (12.00 pm) al momento en que el Sol se encuentra en su punto más alto para una determinada locación. El proceso llevado a cabo para la transformación de tiempo UTC a Tiempo Solar Local y posterior obtención de ángulos de movimiento del Sol se encuentra disponible en Anexos.

Una vez definidas las variables independientes propuestas, se procede a comprobar la existencia de dependencias entre estas y la porción de radiación reflejada según las mediciones obtenidas, tal como se muestra entre las Figura 41 y Figura 46. A fin de evitar que mediciones que no son de interés afecten en el resultado final, los datos son primeramente filtrados, de modo que solo son considerados aquellos datos medidos con un ángulo de elevación del Sol positivo.

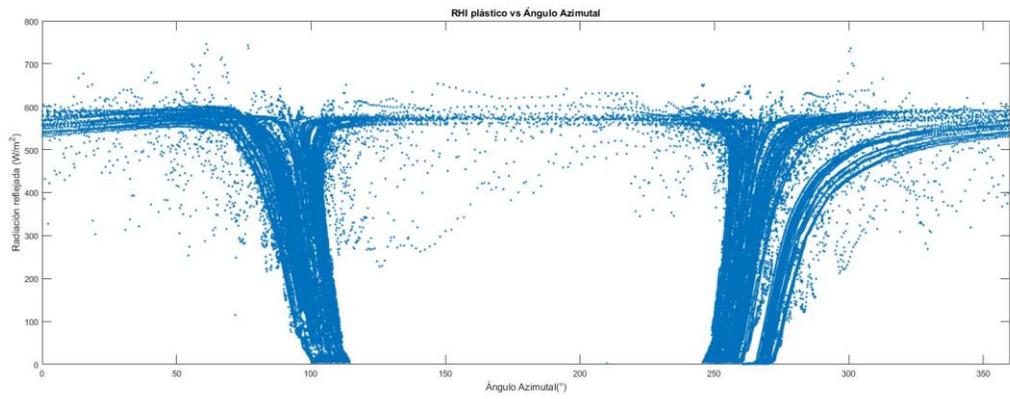


Figura 41. Radiación reflejada plástico vs ángulo azimut.

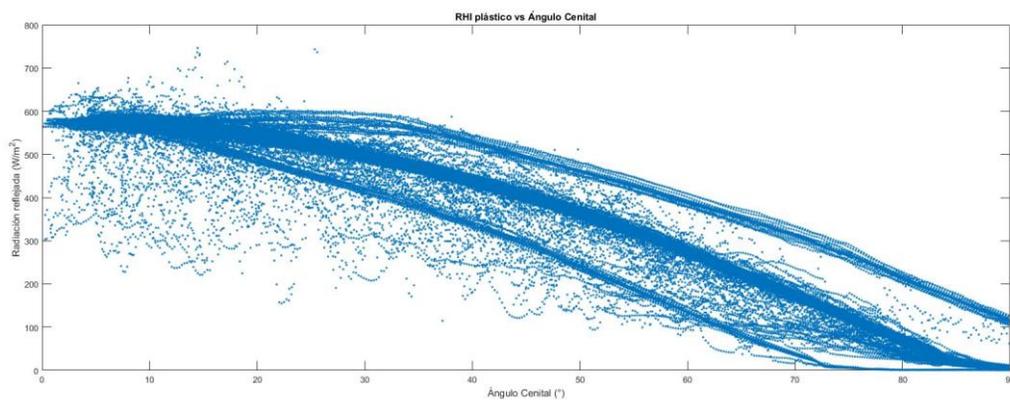


Figura 42. Radiación reflejada plástico vs ángulo cenital.

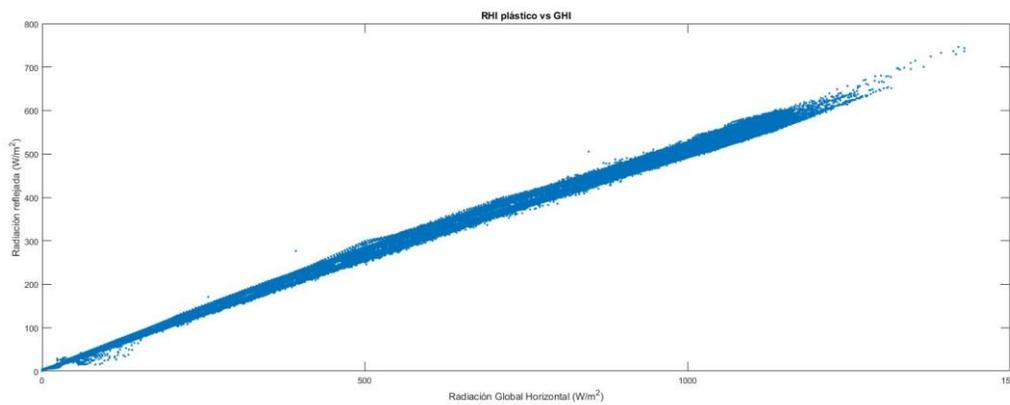


Figura 43. Radiación reflejada plástico vs radiación incidente.

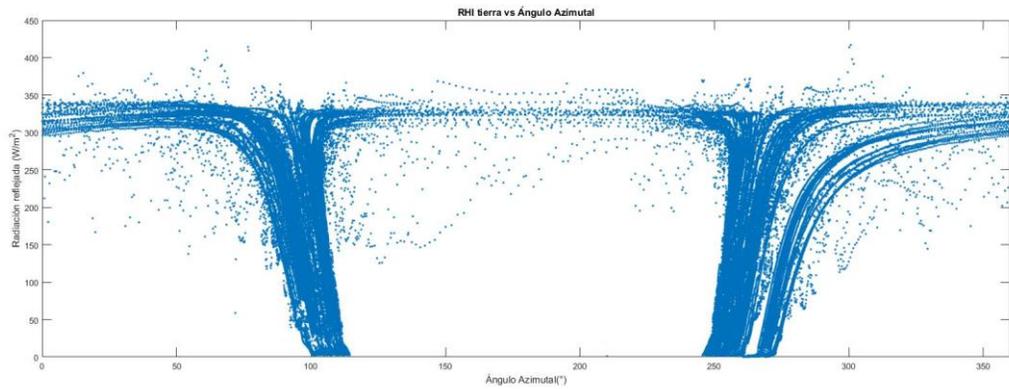


Figura 44. Radiación reflejada tierra vs ángulo azimut.

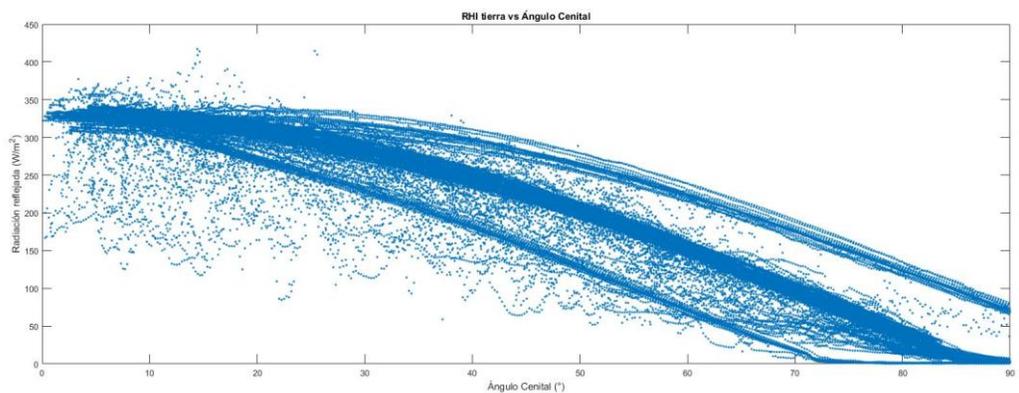


Figura 45. Radiación reflejada tierra vs ángulo cenital.

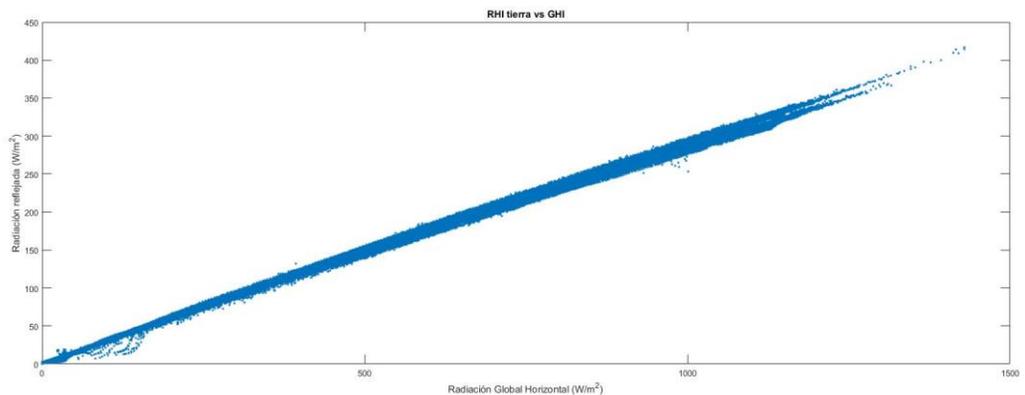


Figura 46. Radiación reflejada tierra vs radiación incidente.

Tanto en el caso del plástico como de la tierra, las variables independientes propuestas encuentras sustento en las dependencias evidenciadas en los gráficos presentados. Con respecto a lo anterior, puede destacarse:

1. La dependencia de la radiación reflejada según el ángulo azimutal es, tal vez, la más difícil de analizar. Esto debido a que esta relación se presenta con una alta variabilidad debido, en particular, a la época del año en que fueron realizadas las

mediciones. Entre Septiembre y los últimos días de Noviembre, aproximadamente, la trayectoria del sol se encuentra al norte de del valle de Lluta. Así, se identifican valores de radiación reflejada para la mañana solar (0 a 90°) y la tarde solar (270 a 360°) con peak a las 12 pm hora solar (0°). De ahí en adelante la trayectoria comienza a ubicarse justo por encima de la latitud del valle, haciendo que todos los valores registrados correspondan a valores del ángulo azimutal cercanos a 90° por la mañana y similares a 270° por la tarde.

Esto explica que en el rango entre 0°-90° y 270°-360°, la radiación reflejada registrada se mantenga de manera casi constante. En los días finales de noviembre hasta el último día de medición (11 de diciembre), la trayectoria del sol pasa a ubicarse al sur de las localidades escogidas, lo cual corresponde en el gráfico a los pocos puntos que registran mediciones de radiación para el rango 100°-250°.

Lo anterior se apoya en la Figura 47 mostrada más abajo, donde se muestra la trayectoria del Sol para el valle de Lluta en el día 16 de Noviembre de 2019. Aquí, la línea amarilla representa la trayectoria para ese día en particular. La zona verde, por otro lado muestra la zona por donde se puede esperar que pase el Sol a lo largo del año.

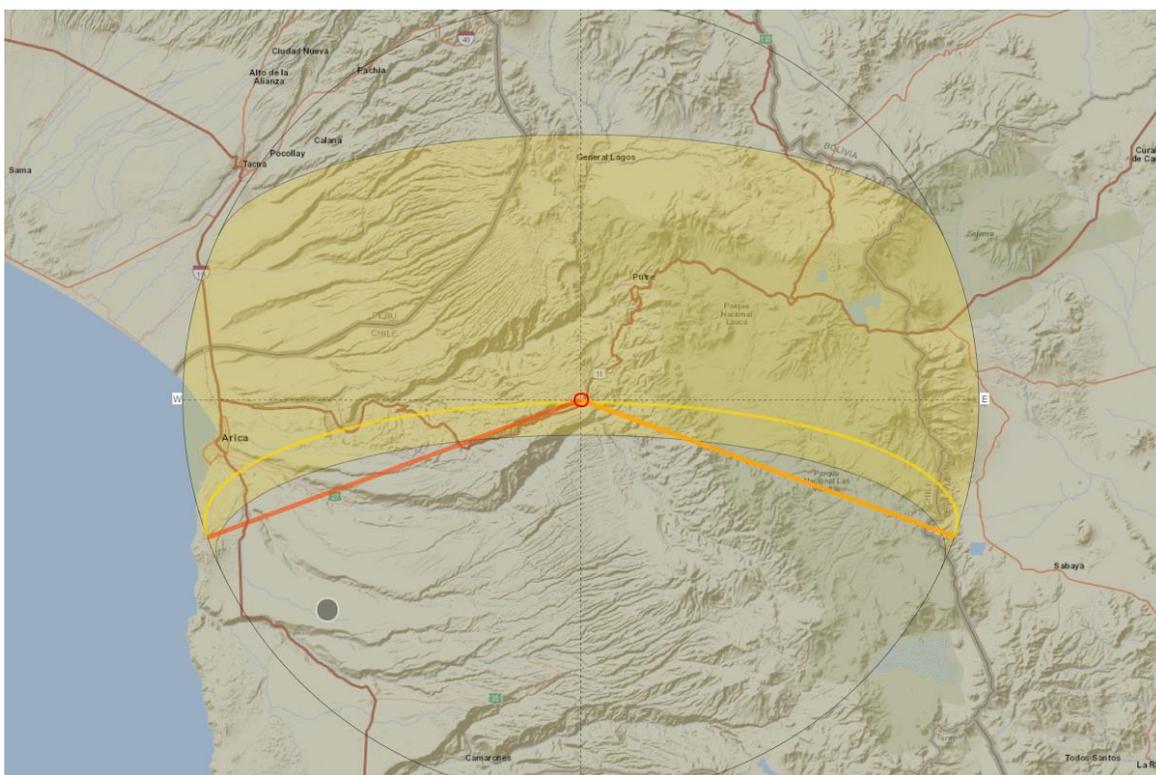


Figura 47. Trayectoria solar para el Valle de Lluta [51].

2. Con respecto al ángulo cenital, la radiación reflejada disminuye a medida aumenta el valor del ángulo cenital. Como se muestra en las Figura 42 y Figura 45 , la radiación máxima se da para el ángulo de 0°, que corresponde a la mayor elevación del sol en el cielo durante el mediodía solar. La existencia de múltiples curvas

decrecientes en el gráfico se explican por el propio movimiento del Sol, haciendo que la altura alcanzada por este astro en el cielo cambie durante el año.

- De manera adicional, la radiación reflejada se relaciona de manera directamente proporcional con el valor de la radiación incidente, tal como se muestra en las Figura 43 y Figura 46.

### Creación del modelo

Para determinar el modelo de cada superficie, se realiza una regresión polinomial sobre 2/3 de los datos elegidos de manera aleatoria. El 1/3 restante es utilizado posteriormente para la validación del mismo.

Para la medición del ajuste del modelo a los datos experimentales se propone la utilización del coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Este parámetro representa el cociente entre la varianza que presenta el modelo y la varianza propia de los datos empíricos. Su valor se encuentra entre 0 y 1, siendo más ajustado el modelo mientras mayor sea el valor de  $R^2$ .

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{Y} - \bar{Y})}{\sum(Y - \bar{Y})} \quad 6.$$

La regresión polinómica es efectuada mediante la función *polyfitn* de Matlab. En primera instancia se evalúan los resultados para polinomios de grado 2, 3 y 4 los cuales son presentados en las Tabla 12 y Tabla 13, para los casos de la superficie de plástico agrícola y la tierra descubierta respectivamente.

Tabla 12. Coeficientes de determinación para el modelo del plástico agrícola.

Grado del polinomio	Coficiente de determinación ( $R^2$ )
2	0,9991
3	0,9995
4	0,9996

Tabla 13. Coeficiente de determinación para el modelo de tierra.

Grado del polinomio	Coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> )
2	0,9990
3	0,9991
4	0,9993

A continuación, se procede a seleccionar el polinomio de grado 2 debido a que presenta valores elevados de R<sup>2</sup>, solo un 0,06% inferior que el valor reportado para el polinomio de grado 3 al mismo tiempo que consta de un modelo más simple lo cual implica menores gastos computacionales al momento de utilizarlo para modelamiento.

El polinomio seleccionado se presenta en la ecuación 7. Los coeficientes se muestran en la Tabla 14.

$$RHI = C_1 AZI^2 + C_2 AZI * CEN + C_3 AZI * GHI + C_4 AZI + C_5 CEN^2 + C_6 CEN * GHI + C_7 CEN + C_8 GHI^2 + C_9 GHI + C_{10} \quad 7.$$

Tabla 14: Coeficientes para polinomios de estimación de albedo.

Coeficiente	RHI plástico	RHI tierra
C <sub>1</sub>	0,001068	0,000412
C <sub>2</sub>	0,004748	0,000981
C <sub>3</sub>	0,000276	0,000075
C <sub>4</sub>	-0,718592	-0,230738
C <sub>5</sub>	0,004000	0,003969
C <sub>6</sub>	0,000442	0,000265
C <sub>7</sub>	-1,119879	-0,432591
C <sub>8</sub>	-0,000032	-0,000012
C <sub>9</sub>	0,489821	0,289538
C <sub>10</sub>	82,684080	19,150882

Los valores de la radiación reflejada calculados mediante el modelo se comparan con los valores medidos en las Figura 48 y Figura 49.

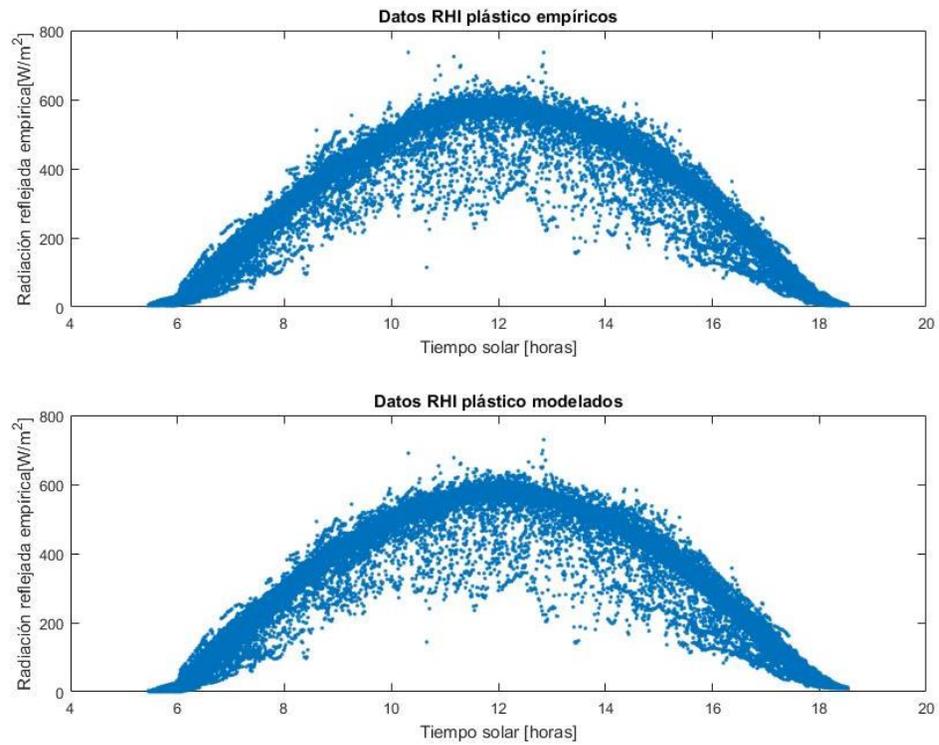


Figura 48. Radiación reflejada empírica y modelada para el caso de plástico.

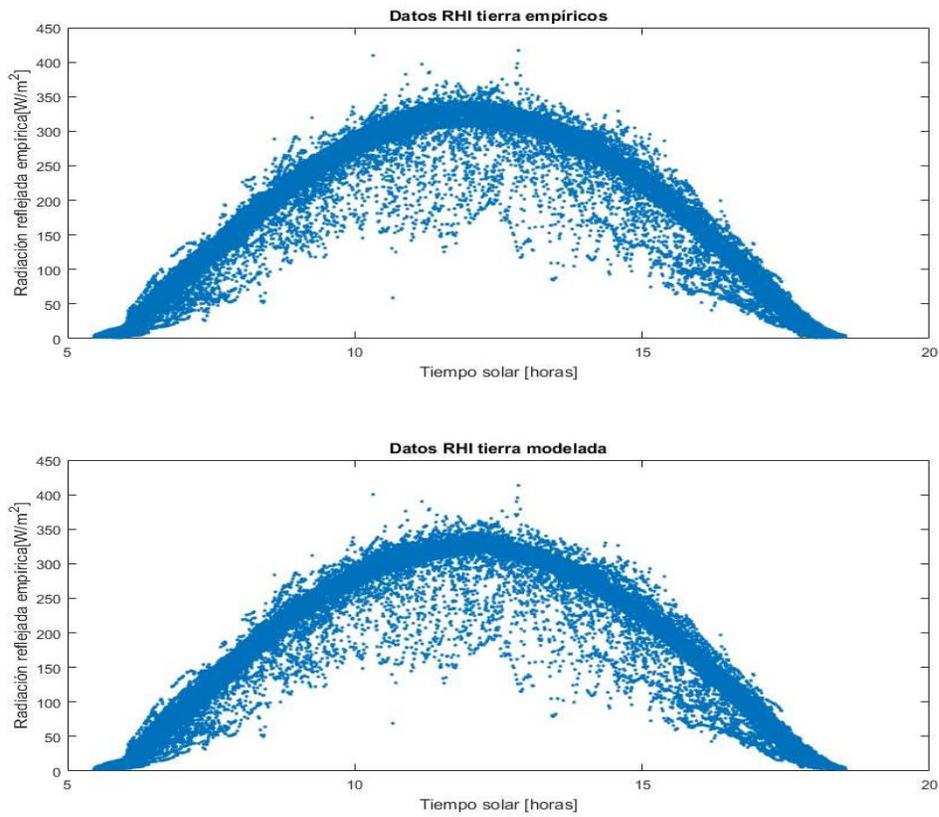


Figura 49. Radiación reflejada empírica y modelada para el caso de tierra.

## Validación

Para este proceso se utilizan los datos restantes, correspondientes a 1/3 del total. Estos datos no fueron utilizados en la creación del modelo y tienen por único objetivo la validación del ajuste de acuerdo, también, al coeficiente de determinación. La comparación entre la medición en terreno de estos datos y del cálculo mediante la utilización del modelo creado se presenta en las Figura 50 y Figura 51.

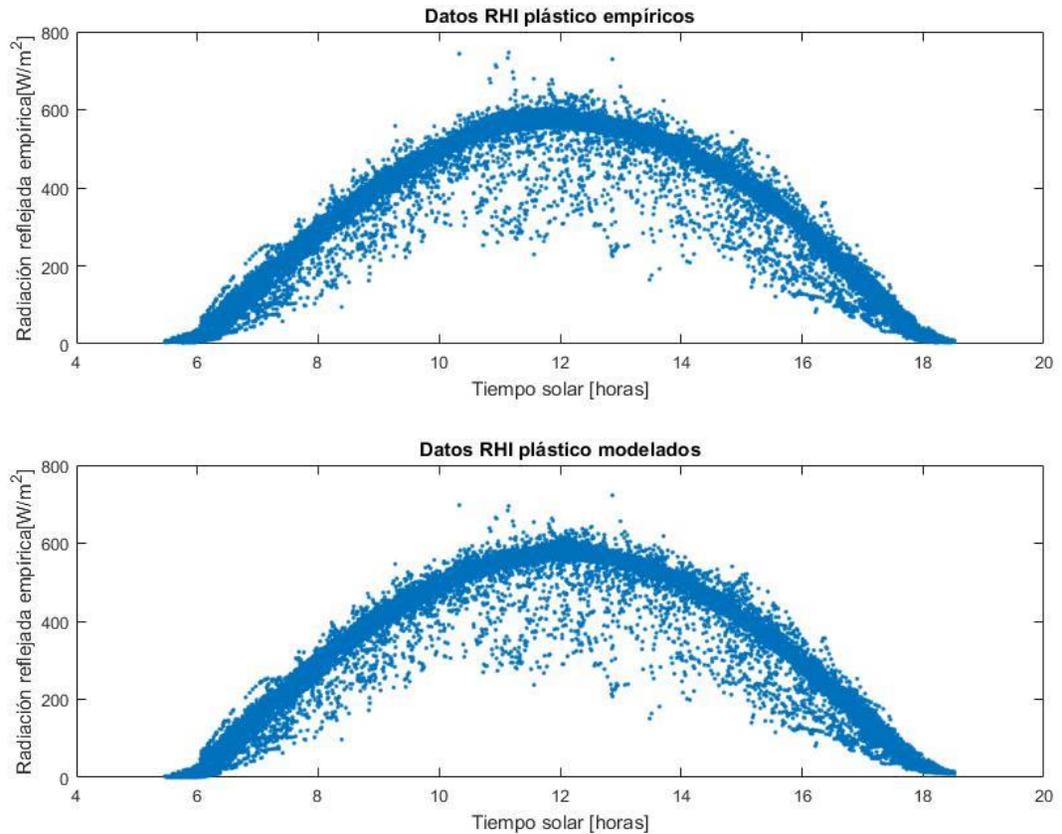


Figura 50. Radiación reflejada empírica y modelada para el caso del plástico.

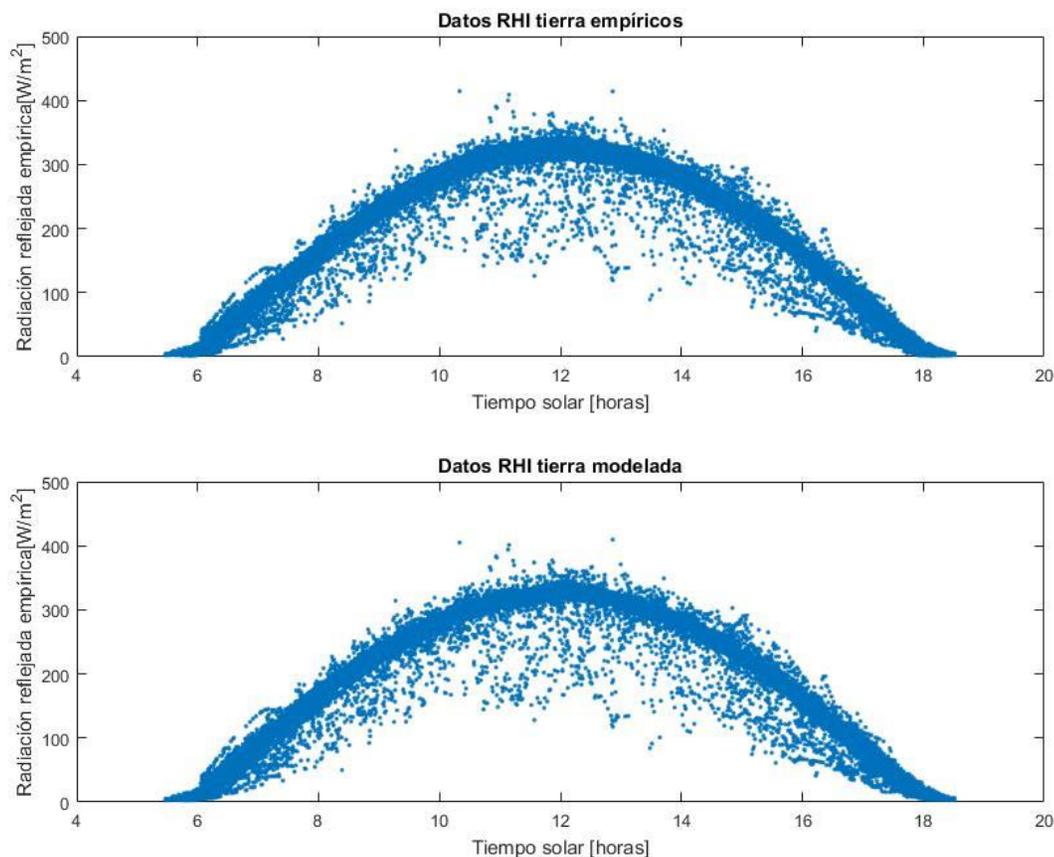


Figura 51. Radiación reflejada empírica y modelada para el caso de tierra.

El proceso de validación también es evaluado mediante el coeficiente de determinación. Los valores obtenidos se muestran a continuación en la

Tabla 15. Coeficientes de determinación para los datos de validación.

Superficie	Coeficiente de determinación ( $R^2$ )
Plástico	0,9987
Tierra	0,9988

Los altos valores para  $R^2$ , tanto para la creación como la validación del modelo apoyan su posterior utilización en este trabajo.

### 5.3. Etapa 3: Estudio de la disposición espacial sobre configuraciones simplificadas

Como fue mencionado anteriormente, la estimación de albedo no solo contempla las características reflectivas particulares de cada componente, sino también la extensión cubierta y la ubicación espacial de cada uno. A fin de lograr calcular de buena manera el efecto causado por la configuración de los suelos sobre la cara posterior del panel, se

trabaja en base a los suelos representativos configuraciones simplificadas para cada uno de los suelos representativos.

### 5.3.1. El factor de visión

La influencia de cada componente sobre el albedo total generado se evalúa mediante el factor de forma o factor de visión de transferencia de calor por radiación entre dos cuerpos, el cual es definido de la siguiente manera:

$$F_{ij} = \frac{\text{radiación emitida desde la superficie } i \text{ que impacta directamente sobre la superficie } j}{\text{radiación total emitida desde la superficie } i}$$

Así, tanto la forma de cada superficie como la posición relativa entre ambas son factores a considerar.

Basado en esta definición, el valor del factor de visión entre dos superficies debe estar contenido en el rango 0-1. Este parámetro puede ser obtenido de manera algebraica, de acuerdo a su definición pura, o estimado mediante diversos métodos [51]. La fórmula general que debe ser utilizada para encontrar este valor es:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos(\theta_i) \cos(\theta_j)}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad 8.$$

Dónde  $r$  es la distancia entre los diferenciales de área de ambas superficies,  $\theta_i$  y  $\theta_j$  son los ángulos entre las normales de  $A_i$  y  $A_j$  y el vector  $\vec{r}$  respectivamente. La evaluación mediante este método resulta de una alta dificultad en ocasiones.

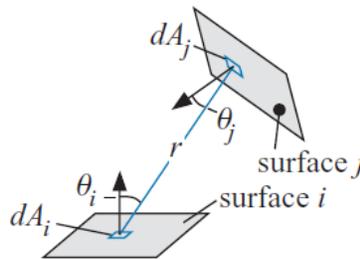


Figura 52. Esquema principio teórico factor de visión.

Toda la radiación emitida por un cuerpo debe impactar alguna superficie de su entorno, por ejemplo, al considerar una superficie emisora que se encuentra encerrada entre tres superficies, debe cumplirse:

$$F_{12} + F_{23} + F_{13} = 1 \quad 9.$$

Lo mismo debe ocurrir al considerar como emisora cualquiera de las otras dos superficies. De manera general, se cumple entonces:

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad 10.$$

El factor de visión también cuenta con la propiedad de reciprocidad, esta señala que la cantidad de radiación intercambiada entre dos superficies es igual independiente de la superficie que se tome como origen, en resumen, el producto entre el factor de visión de la superficie  $i$  y su área es igual al mismo producto de la superficie  $j$ .

$$F_{ij}A_i = F_{ji}A_j \quad 11.$$

### 5.3.2. Aplicación

Dadas las características y restricciones propias del problema presentado en este trabajo, el factor de visión de cada componente perteneciente a las superficies representativas es calculado mediante el método estocástico de Monte Carlo. De manera general, esta técnica es una aproximación poderosa mediante simulación que puede ser utilizada en múltiples problemas de la ingeniería. Esta herramienta es utilizada como método de solución para configuraciones cuyas características entregan una complejidad elevada para la aplicación de métodos determinísticos.

Así, la evaluación del albedo generado por los suelos del valle de Lluta es realizado con respecto a un panel fotovoltaico bifacial situado en el centro de la superficie, en consecuencia, cada factor de visión es calculado en función de esa superficie receptora. Como fue mencionado anteriormente, el objetivo final consiste en la obtención del albedo de las superficies representativas, el cual será obtenido por los valores de albedo de cada componente ponderados en base al factor de visión de cada uno de ellos.

Los supuestos realizados para llevar a cabo esta estimación son detallados en la siguiente lista.

1. Para la estimación se considera un único panel fotovoltaico instalado, cuyas dimensiones son 2m de largo x 1m de ancho.
2. Se consideran superficies representativas de dimensiones mucho mayores que la del panel (Figura 53). Por lo tanto, puede ser considerado que la cara posterior del panel fotovoltaico se encuentra encerrada únicamente por los componentes del suelo representativo. Este punto corresponde a una suposición fuerte, por lo que trae asociada una incertidumbre correspondiente y su comprobación se propone posteriormente para trabajo futuro.

3. Las hincas de las estructuras que soportan a los paneles no son consideradas en el proceso de cálculo del factor de forma de cada componente.
4. Como ya fue mencionado anteriormente, ambos productos agrícolas – considerando planta y biomasa- se consideran como superficies de características equivalentes al pasto verde presentado en la sección 4.2.1. Esta componente se define circular y varía en cada caso, de acuerdo a su ubicación sobre el suelo y a su tamaño, dependiendo del cultivo y de la época del año.
5. El panel es instalado a 3 metros de altura y con una inclinación de  $18^\circ$ .
6. Se desprecian efectos de borde y se evalúa un supuesto panel central de un string.
7. Las superficies representativas corresponden a representaciones del cultivo en 2D, por lo que no son capaces de incluir el efecto de aumento en la altura de los cultivos. Este punto supone otro origen de incertidumbres, dado que a mayor altura se espera una mayor influencia del componente sobre el panel dada la cercanía de ambos cuerpos. Este punto es incluido en la sección de trabajo propuesto.

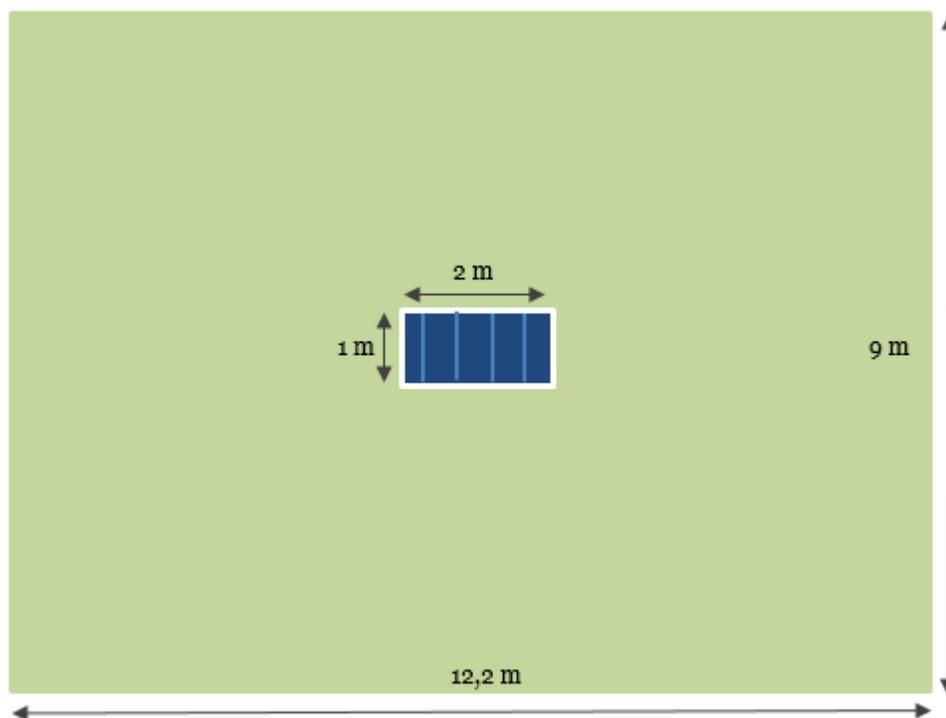


Figura 53. Área escogida para las superficies representativas en comparación panel fotovoltaico.

De manera general, el método de Monte Carlo estima el factor de visión mediante una simulación de trazado de rayos o *ray tracing*. La técnica consiste en generar rayos orientados de manera aleatoria, obteniendo valores al azar para theta y phi de acuerdo a

una distribución normal de probabilidad, desde la superficie emisora y evaluando si estos impactan o no sobre la zona de interés. Finalmente el cociente entre los rayos que impactaron y el total generado entrega el valor para el factor de visión buscado. Este proceso se repite sobre cada una de las superficies emisoras que componen una superficie representativa.

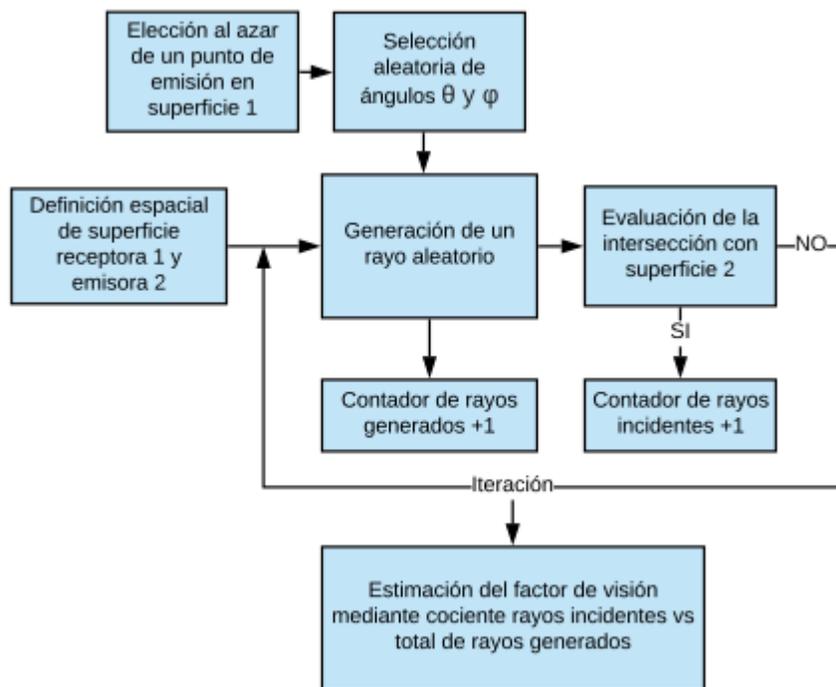


Figura 54. Esquema de los pasos realizados por el método de Monte Carlo programado.

El método empleado para este estudio es desarrollado por medio de la herramienta MatLab y basado en el código disponible en [51].

### 5.3.3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos referentes al factor de visión de cada superficie representativa. De manera específica, se obtiene la distribución de la porción de radiación que alcanza la cara posterior del panel. Para esto, fueron consideradas 9 configuraciones distintas, las que varían por tipo de cultivo y por tamaño del mismo, obteniendo una representación general de la evolución de los productos agrícolas en el año. Las configuraciones evaluadas son:

- Cultivo de cebollas de radio 1 cm.
- Cultivo de cebollas de radio 2 cm.
- Cultivo de cebollas de radio 3 cm.
- Cultivo de cebollas de radio 4 cm.
- Cultivo de berenjenas de radio 3 cm.
- Cultivo de berenjenas de radio 6 cm.
- Cultivo de berenjenas de radio 9 cm.
- Cultivo de berenjenas de radio 12 cm.
- Cultivo de berenjenas de radio 15 cm.

El objetivo de aplicar el factor de forma es encontrar de dónde proviene la radiación que alcanza efectivamente la parte posterior del panel bifacial. En otras palabras, esto puede entenderse como lo que es capaz de ver el panel debido a su ubicación y orientación. Así, los factores de visión que toman al panel como origen corresponden al objetivo de esta etapa. Los valores obtenidos por la simulación de Monte Carlo sirven como datos para la obtención del valor buscado, de la siguiente manera:

Aprovechando la propiedad descrita previamente (ecuación 11), se tiene:

$$F_{cultivo-panel}A_{cultivo} = F_{panel-cultivo}A_{panel} \quad 12.$$

Como se quiere conocer el efecto de todas las cebollas plantadas, se tiene:

$$\begin{aligned} F_{cultivo-panel}A_{cultivo} &= F_{cultivo1-panel}A_{cultivo1} + F_{cultivo2-panel}A_{cultivo2} + \dots \\ &= \sum_i \sum_j F_{ij} A_{ij} \end{aligned} \quad 13.$$

Como se asume que cada cebolla tiene igual área, la ecuación resulta finalmente:

$$F_{cultivo-panel}A_{cultivo} = A_{cultivo} \sum_i \sum_j F_{cultivo ij-panel} \quad 14.$$

En conclusión, el porcentaje de la radiación total, que proveniente de los cultivos, se expresa como:

$$F_{panel-cultivo} = \frac{(A_{cultivo} \sum_i \sum_j F_{cultivo ij-panel})}{A_{panel}} \quad 15.$$

De esta manera se obtienen las distribuciones presentadas a continuación para las configuraciones mencionadas:

### *Cebollas*

Los valores obtenidos mediante el método de Monte Carlo para el parámetro  $F_{cebolla-panel}$  se presentan a continuación.

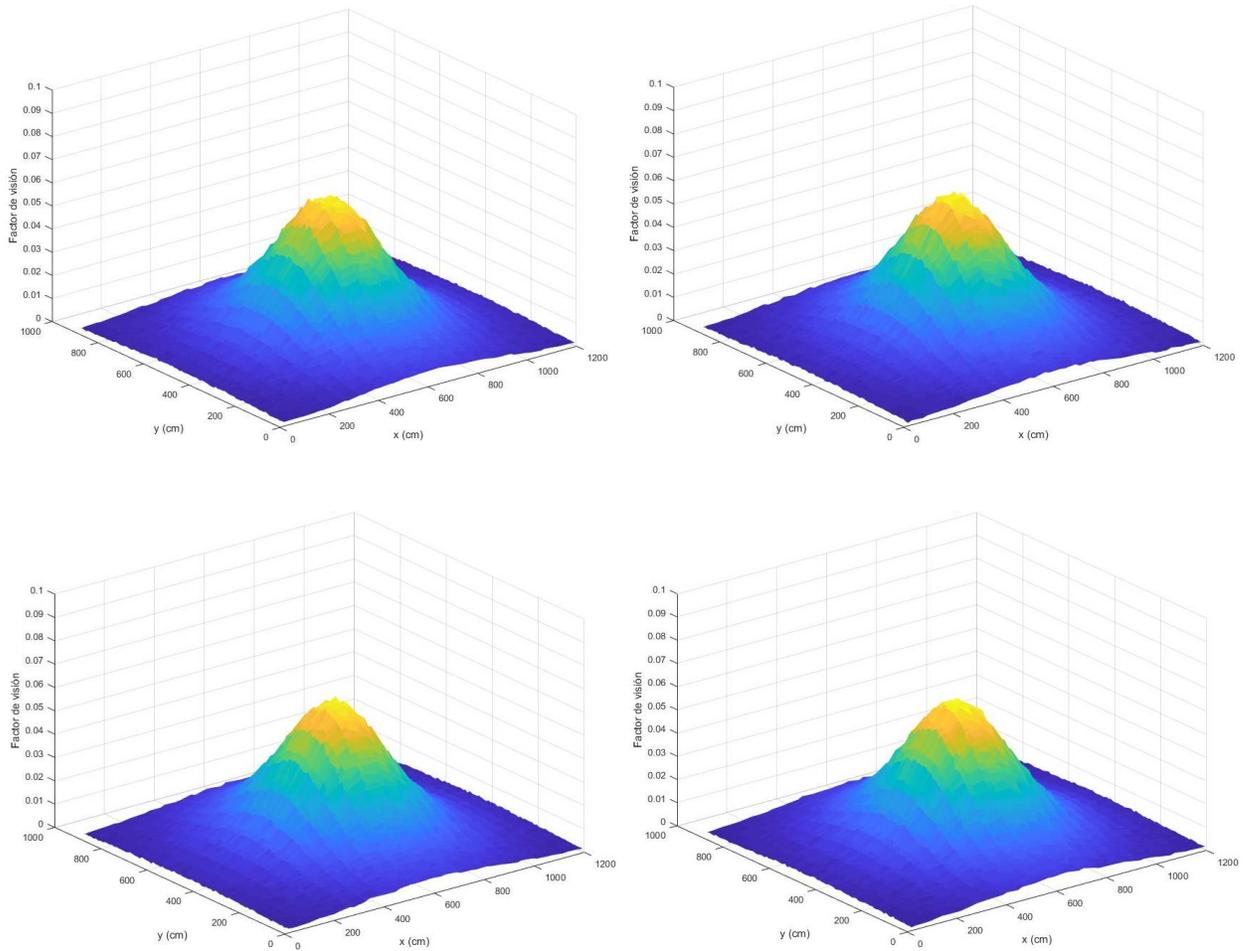


Figura 55. Factor de visión  $F_{cebolla-panel}$  de acuerdo a la posición bajo el panel. Cebollas  $r=1$  (arriba izq.),  $r=2$  (arriba der.),  $r=3$  (abajo izq.) y  $r=4$  (abajo der.).

Los resultados para cada configuración son resumidos y exhibidos en la Tabla 16.

Tabla 16. Factores de visión obtenidos para el caso de cebollas.

Radio (cm)	$A_{cultivo}(m^2)$	$F_{panel-cultivo}$	$F_{panel-tierra}$
1	0,00031	0,00754	0,99246
2	0,00126	0,03017	0,96983
3	0,00283	0,06806	0,93194
4	0,00503	0,12064	0,87936

El valor  $F_{panel-tierra}$  es obtenido como la diferencia entre todo lo que ve el panel (100%) y la fracción que ve de cultivos.

## Berenjenas

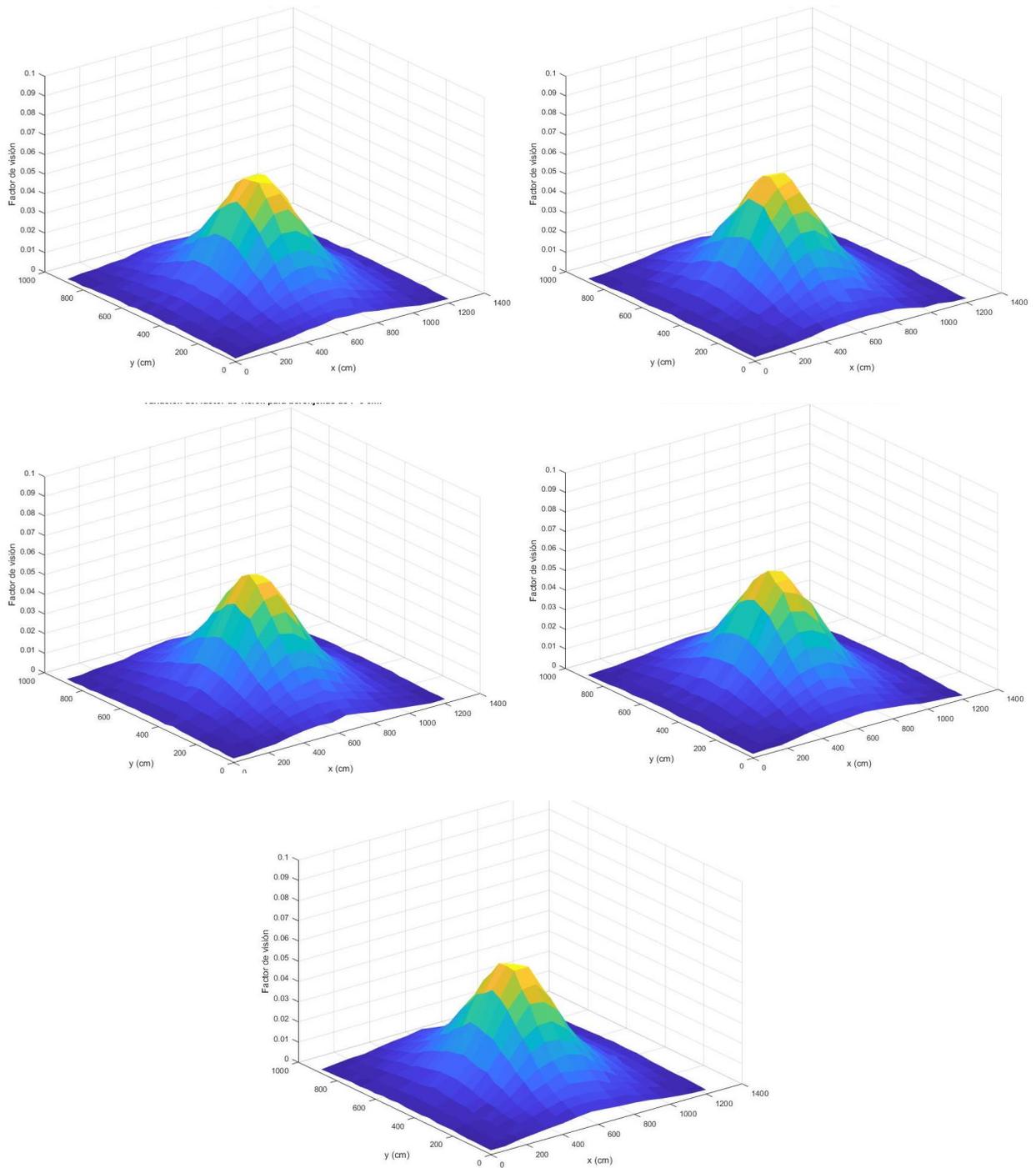


Figura 56. Factor de visión  $F_{berenjena-panel}$  de acuerdo a la posición bajo el panel. Berenjenas  $r=3$  (arriba izq.),  $r=6$  (arriba der.),  $r=9$  (centro izq.) y  $r=12$  (centro der.) y  $r=15$  (abajo).

El caso del cultivo de berenjenas es levemente diferente ya que presenta tres componentes en lugar de los dos correspondientes al cultivo de cebollas. Como se indica en la Figura 56, una hilera de tierra se ubica entre cada film plástico. El impacto de estas hileras sobre la visión total del panel es calculado siguiendo el mismo método y tomando como inicio la simulación de Monte Carlo.

Los resultados correspondientes al cultivo de berenjena y sus diferentes casos son presentados en la Tabla 17.

Tabla 17. Factores de visión obtenidos para el caso de berenjenas.

Radio (cm)	$A_{cultivo}(m^2)$	$A_{tierra}(m^2)$	$F_{panel-cultivo}$	$F_{panel-tierra}$	$F_{panel-plástico}$
3	0,00283	0,90000	0,00659	0,09243	0,90098
6	0,01131	0,90000	0,02633	0,09243	0,88124
9	0,02544	0,90000	0,05918	0,09243	0,84839
12	0,04524	0,90000	0,10473	0,09243	0,80284
15	0,07069	0,90000	0,16374	0,09243	0,74384

Nuevamente, el valor restante – en este caso  $F_{panel-plástico}$  - es encontrado como la diferencia entre el total de visión del panel (100%) y la parte que ya estaba ocupada por tierra o cultivos.

Los factores de visión para el caso del cultivo de cebollas, exhibidos en las Tabla 16 , varían a medida que las cebollas crecen, desde un radio de 1 cm hasta alcanzar el máximo diámetro de 8 cm. La influencia del conjunto de todas las cebollas sobre el panel evoluciona desde 0,754% hasta un máximo de 12,064% para su máximo tamaño, mostrando un crecimiento del orden de 1500%. Esta evolución tiene directa proporción con el área cubierta por producto agrícola, cuyo valor inicial 0,00031 m<sup>2</sup> cambia a 0,00503 m<sup>2</sup>, mostrando un crecimiento del 1522,58 %.

El caso de las berenjenas es análogo. Los valores del factor de visión  $F_{panel-cultivo}$  para este caso (ver Tabla 17), muestran un aumento del 2384,7% entre sus valores mínimo y máximo (0,66% y 16,37%), lo cual se condice con el aumento del área cubierta por las berenjenas, igual a 2397,9%. Así, queda evidenciada la proporcionalidad directa entre el factor de visión y el área de cada componente.

En esta etapa se identifica una posible fuente de error asociada al segundo supuesto descrito al comienzo del capítulo, el cual señala que la cara posterior del panel es capaz de recibir radiación únicamente proveniente de la superficie representativa. Se presenta aquí la posible necesidad de un tamaño mayor de la superficie cubierta para que este supuesto pueda ser cumplido, lo cual conlleva cambios asociados a los resultados obtenidos. Este punto es propuesto posteriormente como trabajo futuro complementario.

Por último, se propone que una futura evaluación del proceso de obtención de factores de visión en base a diferentes alturas de instalación puede resultar interesante para una

comprensión más completa del efecto y la incidencia de este parámetro sobre los factores de visión.

#### 5.4. Etapa 4: Obtención albedo local

Como ya fue mencionado previamente, el albedo local depende principalmente de las condiciones meteorológicas de la zona, las características reflectivas de cada componente de las superficies representativas y la distribución de estos de acuerdo al manejo particular aplicado a cada cultivo.

En la sección 5.2 pudo encontrarse el comportamiento reflectivo tanto del plástico de uso agrícola como de la tierra desnuda. Resulta importante destacar que los valores encontrados obedecen exclusivamente a las condiciones de recurso solar presentes en la PFV El Águila para las fechas en que fue realizado el experimento. Así, para poder conocer el albedo generado por las mismas superficies pero en las localidades seleccionadas del valle de Lluta, debe aplicarse el modelo desarrollado en 5.2.2, esta vez con los datos correspondientes a un año meteorológico típico (TMY) de ambas zonas como input.

Para esto se cuenta con los datos de recurso solar y condiciones meteorológicas de cada una de las áreas estudiadas, los cuales son obtenidos mediante las herramientas Explorador Solar y National Solar Resource Data Base (NSRDB). Se consideran dos fuentes de datos con el objetivo de disminuir el posible error asociado a estos, cuyo proceso de estimación trae asociado una incertidumbre mayor que la generada por el proceso empleado en el montaje experimental de la PFV El Águila.

Debido a lo anterior, en adelante se habla de 4 casos a ser evaluados, indicados en la Tabla 18.

Tabla 18. Definición de casos estudiados.

<b>Caso</b>	<b>Superficie representativa</b>	<b>Fuente datos meteorológicos</b>
1	Berenjenas	Exp. Solar
2	Berenjenas	NSRDB
3	Cebollas	Exp. Solar
4	Cebollas	NSRDB

Las características de los datos de la radiación proveniente del Sol de cada fuente, tienen una gran importancia a la hora de entender los resultados tanto de la reflexión como de la generación energética posteriores. Por ello, a continuación se presentan los niveles de radiación mediante mapas de calor y la composición de esta, en función de la componente directa y difusa.

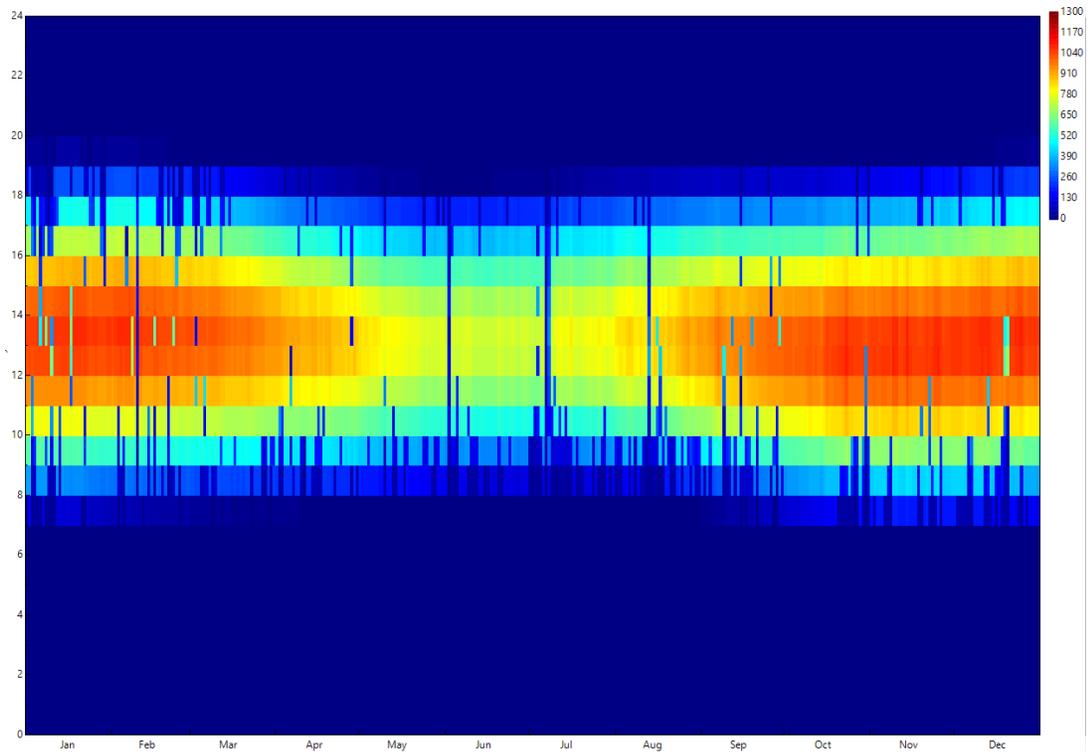


Figura 57. Mapa de calor de irradiancia para el caso 1.

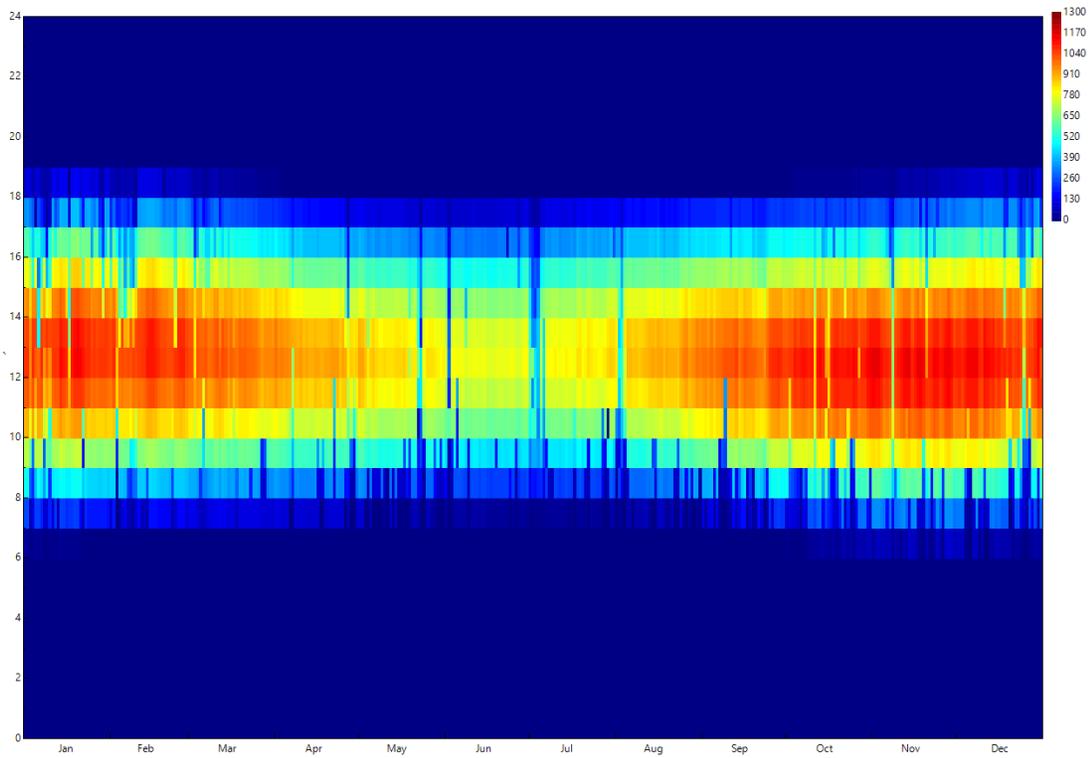


Figura 58. Mapa de calor de irradiancia para el caso 2.

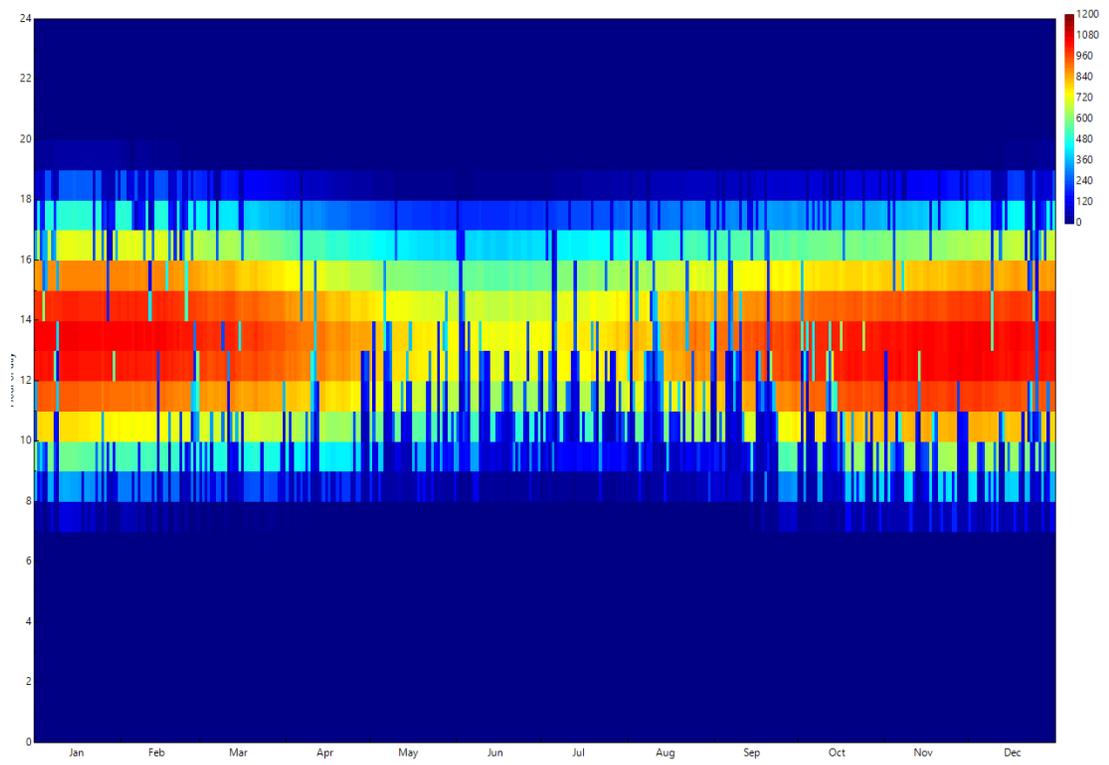


Figura 59. Mapa de calor de irradiancia para el caso 3.

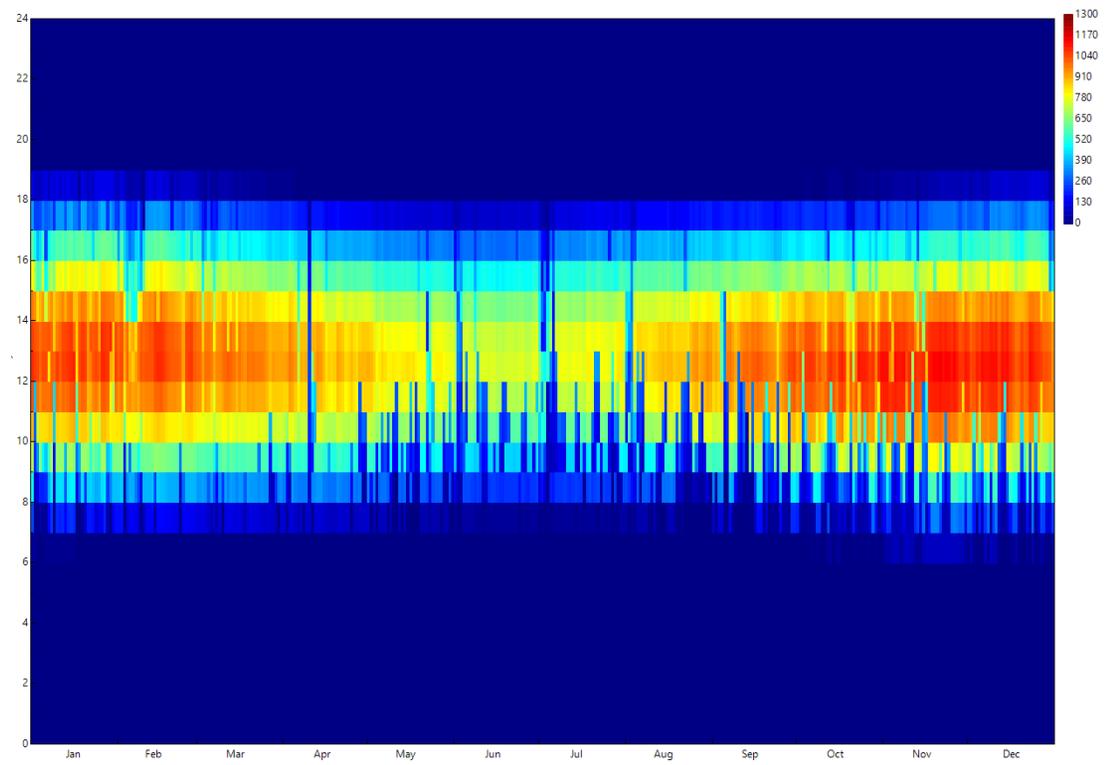


Figura 60. Mapa de calor de irradiancia para el caso 4.

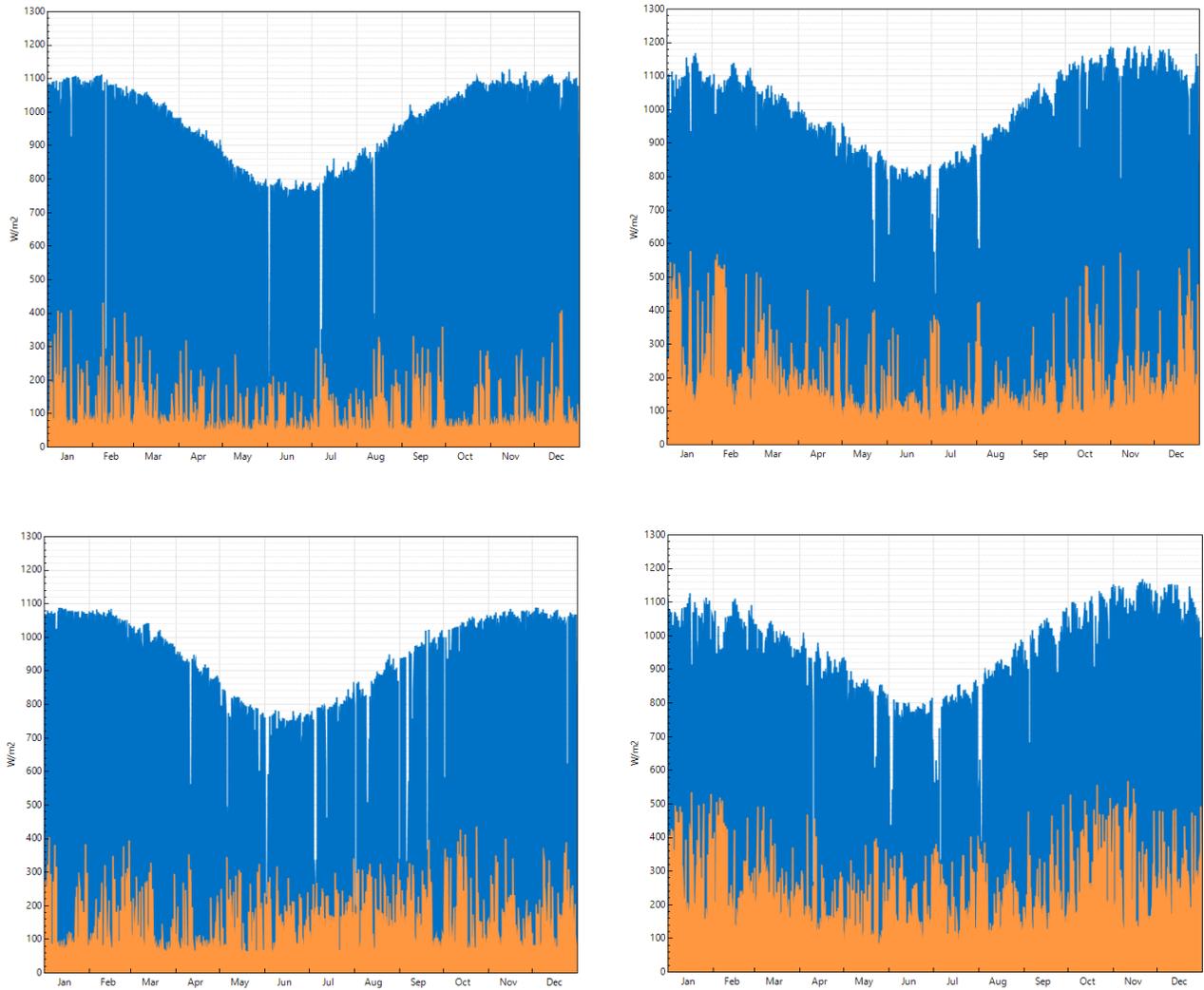


Figura 61. Recurso solar disponible según cada caso. Radiación GHI (azul) comparada con la radiación difusa (naranja). Caso 1 (arriba-izq.), caso 2 (arriba-der.), caso 3 (abajo-izq.) y caso 4 (abajo-der.).

Estos datos son posteriormente complementados con los valores de los ángulos azimutal y cenital, los cuales son calculados en base a la Hora Solar Local. Más información referente a estos cálculos puede ser encontrada en Anexos.

Los distintos datos meteorológicos propuestos para el cálculo del albedo local presentan diferencias importantes referentes al recurso solar disponible. Esto queda evidenciado en los mapas de calor de las Figura 57 a la Figura 60. De la comparativa resulta la distinción de mayor recurso solar para el territorio de berenjenas, lo cual es identificable mediante la distribución de colores, junto con los valores máximos registrados (1300 W/m<sup>2</sup> para la localidad de Edgar Salvador y 1200 W/m<sup>2</sup> para la de Izzamar Cayo). Junto con esto, se perciben diferencias entre los datos provenientes del Explorador Solar y la NSRDB para la misma zona. Basado también en las distribuciones de colores, mayores valores de irradiación global son registrados para el caso de los datos obtenidos desde la NSRDB.

Otra diferencia identificada corresponde a la composición de la radiación de cada fuente de datos observada en los gráficos de la Figura 61. En estos, puede observarse que los datos de radiación provenientes del Explorador Solar presentan valores de radiación difusa menores que los presentados por la NSRDB.

Una vez que los datos se encuentran preparados, estos son incorporados al modelo estimador de reflexión. Los resultados aquí obtenidos son ponderados por los factores de visión de cada configuración y mes del año, los cuales son presentados a continuación:

Tabla 19. Factores de visión anuales para cebollas.

Mes	Factor de visión (%)	
	Cebollas	Tierra
Enero	0,00	100,00
Febrero	0,00	100,00
Marzo	0,75	99,25
Abril	3,01	96,99
Mayo	6,81	93,19
Junio	12,06	87,94
Julio	0,00	100,00
Agosto	0,75	99,25
Septiembre	3,01	96,99
Octubre	6,81	93,19
Noviembre	12,06	87,94
Diciembre	0,00	100,00

Tabla 20. Factores de visión anuales para berenjenas.

Mes	Factor de visión (%)		
	Berenjenas	Tierra	Plástico
Enero	0,00	100,00	0,00
Febrero	0,66	9,24	90,10
Marzo	2,63	9,24	88,12
Abril	5,92	9,24	84,84
Mayo	10,47	9,24	80,28
Junio	16,37	9,24	74,38
Julio	0,66	9,24	90,10
Agosto	2,63	9,24	88,12
Septiembre	5,92	9,24	84,84
Octubre	10,47	9,24	80,28
Noviembre	16,37	9,24	74,38
Diciembre	0,00	100,00	0,00

Las variaciones de este factor a lo largo del año se deben al crecimiento de cada cultivo y al calendario de actividades declarado por los agricultores en la sección 5.1.

Tomando en consideración todo lo anterior, los valores de albedo generados por las superficies representativas son obtenidos a lo largo del año. El cálculo de estos valores

sigue el procedimiento empleado en 5.2.2, por lo que los valores presentados en la Figura 62 y Figura 63 corresponden a albedo normalizado.

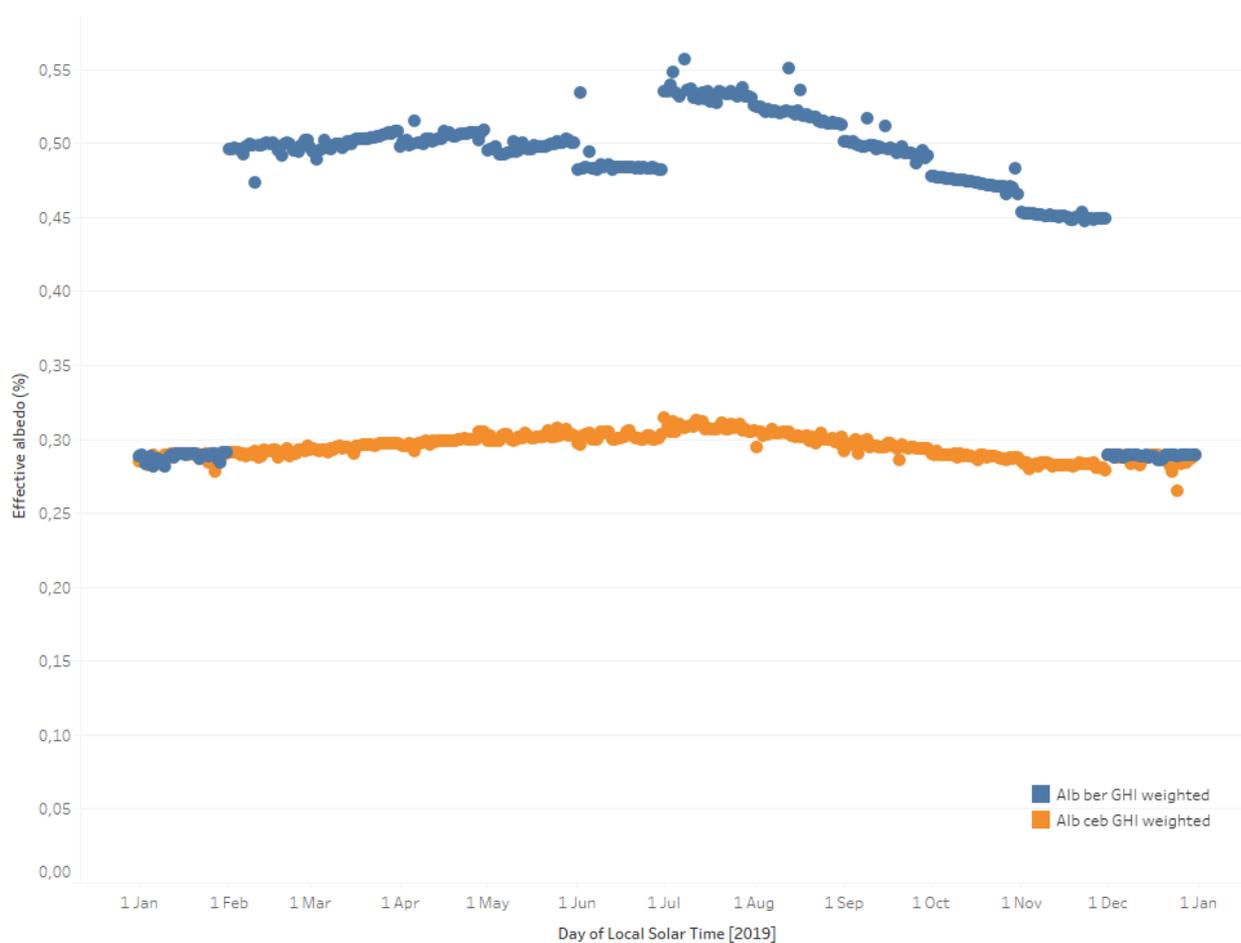


Figura 62. Albedo efectivo diario para caso 1 (azul) y caso 3 (naranja).

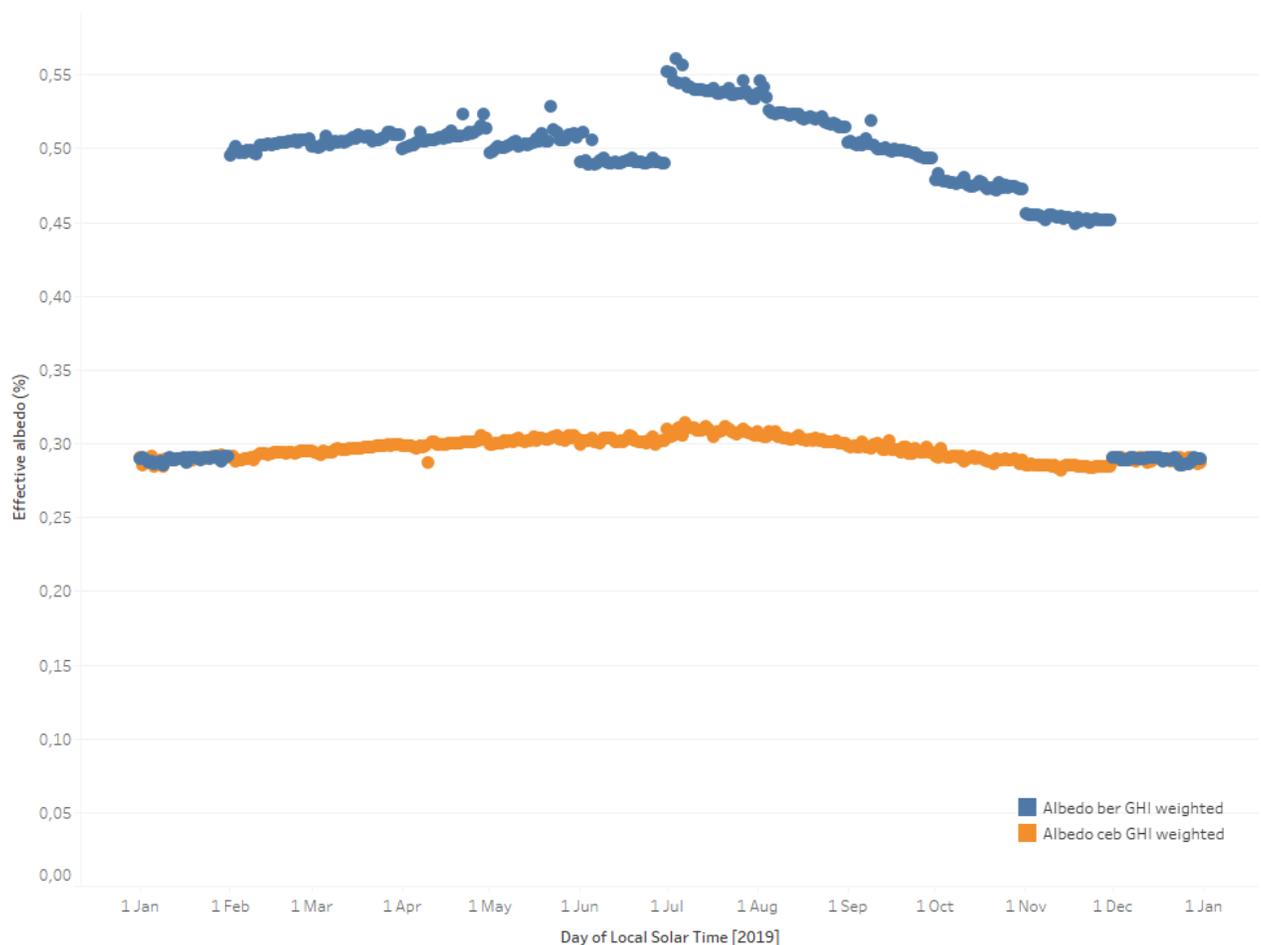


Figura 63. Albedo efectivo diario para caso 2 (azul) y caso 4 (naranja).

Al corresponder el albedo a una característica propia del suelo, la similitud en el albedo generado para los datos provenientes del Explorador Solar y la NSRDB presentados en la Figura 62 y Figura 63, hace sentido. Los resultados aquí expuestos también se condicen con lo detectado en terreno, para cada uno de los componentes estudiados. Así, se identifica que para las fechas en que ambos cultivos están compuestos exclusivamente por suelo desnudo (enero y diciembre), los valores de albedo son prácticamente iguales y cercanos al 29%, tal como fue encontrando gracias al montaje experimental de la PFV El Águila.

En la primera mitad del año de cultivo de berenjenas, se identifica en primera instancia un rápido aumento en febrero producto de la instalación del plástico. En adelante, toma parte un doble efecto sobre el albedo: por un lado la mayor influencia de la radiación difusa aumenta el valor de albedo, mientras que el crecimiento de las berenjenas reduce el valor de albedo total de la superficie. En julio, al cosecharse las berenjenas, permanece exclusivamente el efecto asociado a la radiación difusa, logrando así el mayor valor registrado en el año. Durante el segundo semestre, ambos efectos identificados anteriormente colaboran hacia una disminución del albedo, tal como queda evidenciado en el decrecimiento constante hasta diciembre, donde finalmente tiene lugar el retiro del plástico agrícola y la correspondiente baja en el valor de albedo. A lo largo del año, es posible identificar pequeños saltos o discontinuidades, las cuales son producto del

cambio del tamaño de las berenjenas que se realiza cada mes. Si se contara con un crecimiento constate, es decir, un caso más real, estas discontinuidades no debiesen estar presentes.

El caso del cultivo de cebollas, por otro lado, se mantiene constante dentro del rango 28-32%. Resulta curioso que se presente una tendencia creciente hacia mitad de año y decreciente hacia los periodos sin cultivo. Esto puede deberse a una mayor componente difusa en ese periodo, tal como se señala en los gráficos de la Figura 61 y de manera análoga a lo registrado en el caso de las berenjenas. De acuerdo con esto resulta correcto que el valor máximo de albedo se genere para julio, mes en que el suelo se encuentra sin cultivos y con el mayor aporte de radiación difusa con respecto al total. A diferencia del caso de la superficie de berenjenas, las cebollas no consiguen contrarrestar el aumento en el albedo de la primera mitad del año, esta diferencia radica en el área efectiva ocupada por cada cultivo y representada por medio del factor de visión, el cual alcanza un máximo superior al 16% para berenjenas y cercano al 12% para las cebollas.

Finalmente, se presentan los perfiles de reflexión para un año típico (TMY) para cada caso. La Figura 64, Figura 65, Figura 66 y Figura 67, comparan la radiación global horizontal y la reflejada de cada caso.

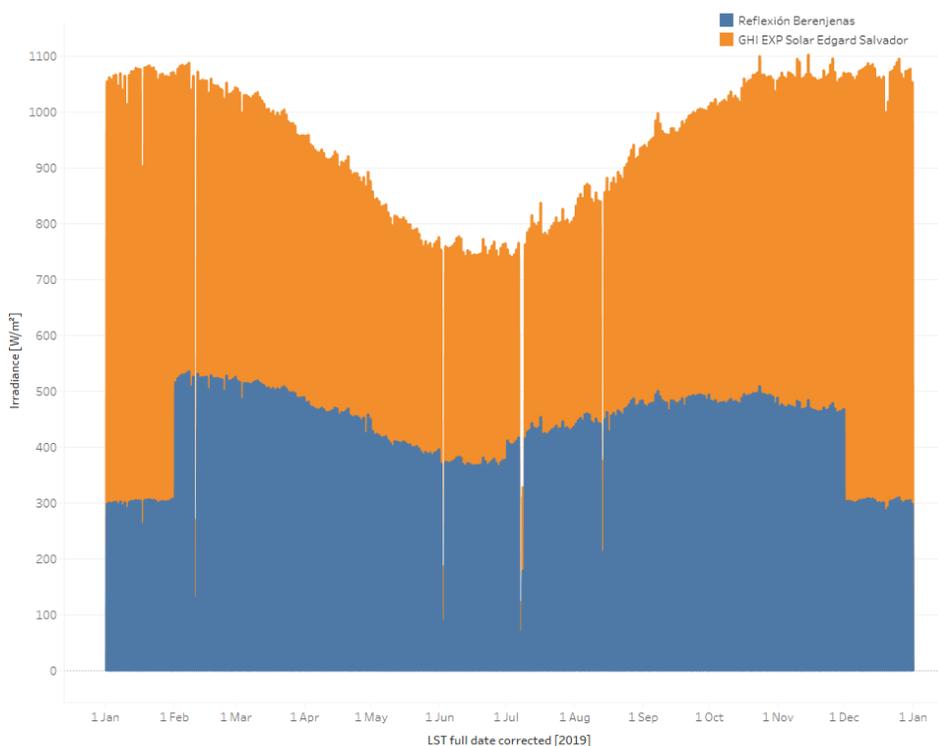


Figura 64. Radiación reflejada y GHI para el caso 1.

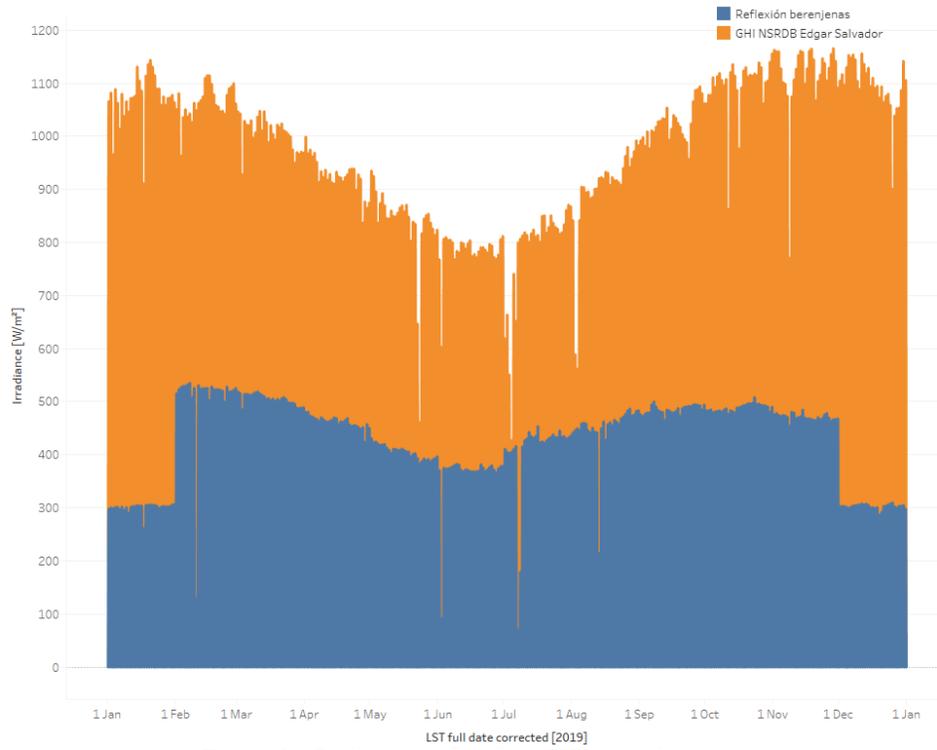


Figura 65. Radiación reflejada y GHI para el caso 2.

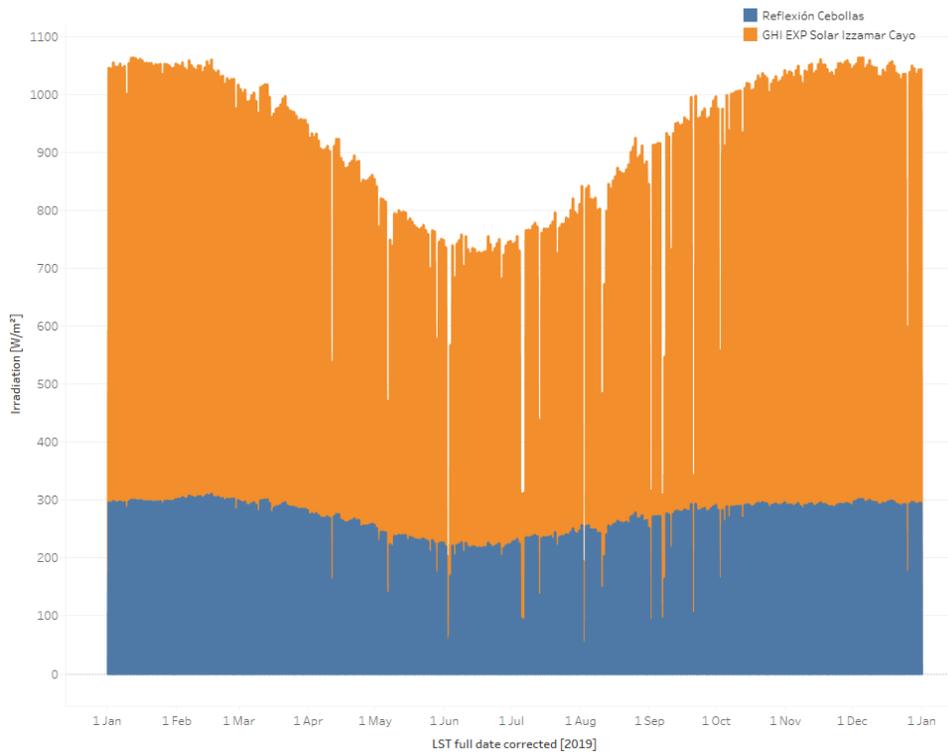


Figura 66. Radiación reflejada y GHI para el caso 3.

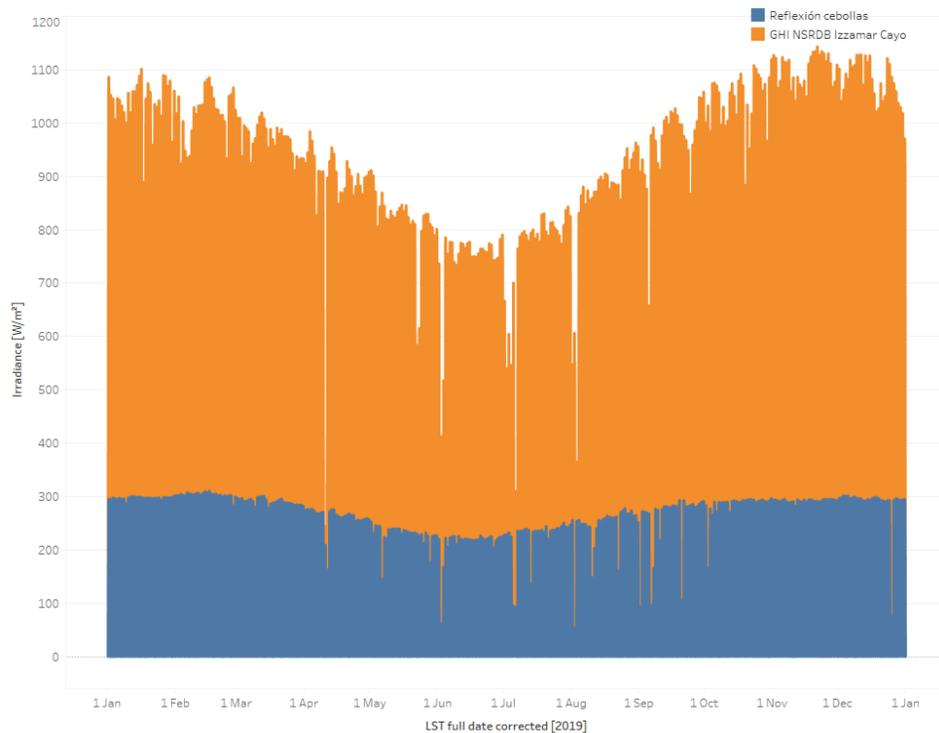


Figura 67. Radiación reflejada y GHI para el caso 4.

Entre las Figura 64 y la Figura 67, se exhiben los resultados de la reflexión generada por los suelos representativos ante las condiciones de cada localidad particular. Cabe mencionar que la radiación reflejada se compone del producto entre la radiación incidente y el albedo de cada caso, por lo que la distribución de la radiación reflejada debe seguir, de manera aproximada la detectada para la evolución de albedo.

Estos valores componen la base de este estudio. Su impacto sobre la generación energética es evaluado en el capítulo que procede.

## Capítulo 6: Simulación

En este capítulo se describe el procedimiento empleado para la realización de las simulaciones de cada caso, seguido de los resultados correspondientes que permiten una posterior comparación entre las tecnologías fotovoltaicas. Las simulaciones son realizadas mediante el programa System Advisor Model (SAM) desarrollado por el centro de desarrollo NREL y tomando los resultados de la sección anterior como principal input.

### 6.1. Configuración

Los casos para analizar siguen la misma definición que la declarada previamente en la Tabla 18. A esto se agrega la evaluación de un panel monofacial y uno bifacial para poder realizar una comparación por cada caso.

La configuración básica de la instalación es común para todos los casos. Esta se compone de:

- 1 panel fotovoltaico
- Punto medio del panel instalado a 3 metros del suelo
- Inclinación de  $18^\circ$  (tilt = latitud)
- Orientación norte (ángulo azimutal =  $0^\circ$ )

De manera de ser consistente, esta configuración corresponde, también, a la misma utilizada para el cálculo de los valores del factor de visión.

#### 6.1.1. Equipos

Las características del panel seleccionado son presentadas en la Tabla 21. Características del panel seleccionado.

Tabla 21. Características del panel seleccionado.

Características comerciales			
Marca	SolarWorld		
Modelo	Sunmodule SW 315 XL mono		
Tecnología	Mono-c-Si		
Características del módulo bajo STC			
Eficiencia nominal	16,12 %	Coef. de temperatura	-1,531 W/°C
Potencia máxima (Pmp)	317,58 Wdc		-0,151 Voc/°C
Voltaje de máx. Potencia (Vmp)	36,80 Vdc		0.002 Aoc/°C
Corriente de máx. Potencia (Imp)	8,60 Adc		
Voltaje corto circuito (Voc)	45,90 Voc		
Corriente de corto circuito (Ioc)	90,20 Adc		
Especificaciones bifaciales			
Fracción de transmisión	0,013 %		
Factor de bifacialidad	0,600		

Por otro lado, a modo de entregar valores de comparación y análisis adicionales para los distintos casos estudiados, se establece una configuración de sistema convertidor de energía adecuado, que permite incluir los efectos de la instalación bifacial en la generación final de corriente alterna. Para esto se selecciona un inversor con valor de potencia máxima AC por encima de la potencia nominal del panel, lo anterior a modo de evitar que la ganancia bifacial energética se pierda en la conversión debido a capacidad restringida del sistema inversor. Los detalles de la configuración “aguas abajo” del panel fotovoltaico se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Características del inversor seleccionado

Características comerciales			
Marca	Altenergy Power System		
Modelo	YC 500 A		
Características eléctricas			
Potencia máxima AC (Wac)	500,0	Voltaje nominal AC (Vac)	208,0
Potencia máxima DC (Wdc)	529,7	Voltaje máximo DC (Vdc)	15,13
Potencia consumida en operación (Wdc)	2,1	Corriente máxima DC (Adc)	15,1
Consumo potencia de noche (Wac)	0,2	Eficiencia medida <sup>(1)</sup> (%)	94,7 - 94,9

<sup>(1)</sup> Rango entre CEC weighted efficiency y European weighted efficiency

Así, al considerar la instalación de un único equipo en el arreglo, se determina un *DC/AC ratio* de 0,64, lo cual permite la generación de energía por la cara posterior del panel y su posterior conversión a corriente AC sin pérdidas asociadas a capacidad del equipo.

### 6.1.2. Pérdidas

En todo el sistema de generación fotovoltaica se presentan diferentes posibles fuentes de pérdidas adicionales a los rendimientos del panel y el inversor especificados previamente. En la Tabla 23 se presentan todas las fuentes de pérdidas consideradas por el programa SAM junto con el respectivo valor escogido para esta simulación.

Tabla 23. Pérdidas en generación de energía

Radiación POA	
Soiling frontal mensual (%)	5,0
Soiling bifacial mensual (%)	2,0
Pérdidas DC	
Module mismatch (%)	0,0
Diodos y conexiones (%)	0,5
DC wiring (%)	2,0
Nameplate (%)	0,0
DC power optimizer loss (%)	0,0
Pérdidas AC	
AC wiring (%)	1,0

Para definir estos valores, se siguen las recomendaciones presentadas en el manual del programa SAM para la configuración escogida. Así, las pérdidas de radiación incidente se fijan en 5% y 2% mensual respectivamente para la cara frontal y posterior del módulo. Con respecto a la parte DC, al estar el sistema compuesto exclusivamente por un panel fotovoltaico y sin presencia de sistema optimizadores, las pérdidas asociadas a mismatch, diodos de by-pass y optimizador DC se definen como inexistentes. Los efectos de las resistencias intrínsecas del cableado se estiman en 2% de pérdidas de energía, mientras que las diferencias entre el desempeño del panel y su datasheet se establece en 0. Por último, a nivel del inversor las pérdidas del cableado se establecen en 1%.

## 6.2. Resultados

Los resultados de las simulaciones son presentados a continuación, siguiendo el orden en que se realiza la conversión de energía.

### 6.2.1. Radiación disponible en el panel FV

La presencia de una segunda cara disponible para la generación de energía en la configuración bifacial se traduce en una mayor cantidad de radiación que puede ser aprovechada por el panel. En los gráficos posteriores se presenta una comparativa entre la energía proveniente de la radiación efectiva que llega directamente a la cara frontal (color naranja) comparado con la fracción que alcanza la cara posterior (color azul) para los casos 1 y 3. La finalidad de estos gráficos consiste en mostrar de manera visual la relación entre radiación incidente y reflejada. Los casos 2 y 4 no son presentados para no sobrecargar el documento. De todas formas, un análisis completo es realizado posteriormente.

Resulta importante destacar que la energía de la radiación efectiva en el plano del arreglo incluye tanto la radiación disponible como el efecto de pérdidas asociado al soiling de ambas caras. Estos valores, junto con la ganancia bifacial de generación de energía presentada posteriormente, constituyen el foco de este trabajo.

En las Tabla 24 y Tabla 25 se presentan los valores de energía en la cara frontal y trasera y la ganancia bifacial de radiación asociada para cada mes del año meteorológico típico (TMY).

Tabla 24. Energía que alcanza el plano de arreglo y ganancia bifacial de radiación mensual para superficie de berenjenas.

Mes	Explorador Solar			NSRDB		
	Frontal [kWh/mes]	Trasera [kWh/mes]	<b>G.B radiación [%]</b>	Frontal [kWh/mes]	Trasera [kWh/mes]	<b>G.B radiación [%]</b>
Enero	387,88	89,16	<b>0,23</b>	408,75	93,58	<b>0,23</b>
Febrero	358,63	130,16	<b>0,36</b>	379,27	136,88	<b>0,36</b>
Marzo	418,52	137,02	<b>0,33</b>	424,67	140,78	<b>0,33</b>
Abril	384,74	112,09	<b>0,29</b>	389,51	115,87	<b>0,30</b>
Mayo	371,27	95,44	<b>0,26</b>	378,04	99,53	<b>0,26</b>
Junio	335,97	79,01	<b>0,24</b>	351,22	84,48	<b>0,24</b>
Julio	337,02	91,00	<b>0,27</b>	357,57	98,34	<b>0,28</b>

Agosto	377,59	109,09	<b>0,29</b>	402,03	117,63	<b>0,29</b>
Septiembre	393,06	122,63	<b>0,31</b>	422,82	132,54	<b>0,31</b>
Octubre	427,76	142,55	<b>0,33</b>	444,19	148,29	<b>0,33</b>
Noviembre	410,40	144,46	<b>0,35</b>	429,26	150,39	<b>0,35</b>
Diciembre	406,51	96,88	<b>0,24</b>	414,18	97,53	<b>0,24</b>

Tabla 25. Energía que alcanza el plano de arreglo y ganancia bifacial de radiación mensual para superficie de cebollas.

Mes	Explorador Solar			NSRDB		
	Frontal [kWh/mes]	Trasera [kWh/mes]	<b>G.B irradiación [%]</b>	Frontal [kWh/mes]	Trasera [kWh/mes]	<b>G.B irradiación [%]</b>
Enero	379,20	86,70	<b>0,23</b>	392,75	89,34	<b>0,23</b>
Febrero	345,64	73,59	<b>0,21</b>	364,31	77,73	<b>0,21</b>
Marzo	398,77	77,41	<b>0,19</b>	405,34	79,95	<b>0,20</b>
Abril	351,86	61,88	<b>0,18</b>	365,87	65,38	<b>0,18</b>
Mayo	301,05	48,10	<b>0,16</b>	346,53	55,91	<b>0,16</b>
Junio	266,77	40,39	<b>0,15</b>	304,83	46,70	<b>0,15</b>
Julio	273,60	43,68	<b>0,16</b>	303,78	49,33	<b>0,16</b>
Agosto	297,22	51,35	<b>0,17</b>	333,33	58,16	<b>0,17</b>
Septiembre	301,95	57,31	<b>0,19</b>	352,20	67,04	<b>0,19</b>
Octubre	359,29	73,28	<b>0,20</b>	390,17	79,78	<b>0,20</b>
Noviembre	360,72	78,66	<b>0,22</b>	390,04	86,56	<b>0,22</b>
Diciembre	360,94	83,44	<b>0,23</b>	397,39	92,58	<b>0,23</b>

Finalmente se presentan también los valores de ganancia bifacial de radiación a nivel anual.

Tabla 26. Energía de radiación extra disponible para configuración bifacial.

Cultivo	Ganancia bifacial anual radiación POA (%)	
	Datos Exp Solar	Datos NSRDB
Berenjenas	29,28	29,49
Cebollas	19,41	19,52

De los datos presentados, se obtiene:

1. Se confirma que los niveles de energía disponibles en ambas caras del panel son siempre mayores para la localidad de berenjenas, esto queda expuesto al comparar los valores de radiación disponible en el POA para la cara frontal de cada caso.
2. Para el caso de las berenjenas se identifica lo siguiente:

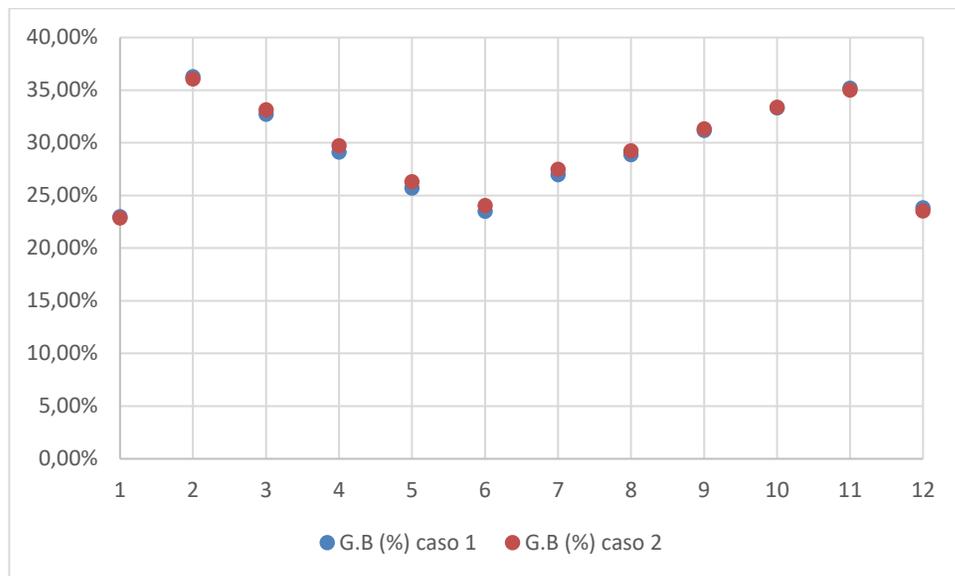


Figura 68. Evolución ganancia bifacial en el año. Caso 1 y 2.

- a. La radiación disponible en la cara frontal es mayor para el caso 2, causado por un mayor recurso solar proveniente de la base de datos de NSRDB.
  - b. La ganancia bifacial también resulta mayor para el caso 2 (evidenciado en los valores anuales). Lo anterior puede explicarse por una mayor componente difusa en la base de datos de la NSRDB.
  - c. Tal como se presenta en la Figura 68, la ganancia bifacial generada en el Valle de Lluta varía de acuerdo al mes, de la misma manera para el caso 1 y 2. Esto depende directamente de la posición azimutal del Sol y sus variaciones referentes a ambas localidades del valle a lo largo del año. En junio, cuando el Sol se encuentra más al norte, la ganancia bifacial asociada es mínima. Para los meses de enero y diciembre, donde el sol se encuentra más al sur para la localidad escogida, los valores debiesen ser máximos. Sin embargo, la ausencia del material plástico en esas fechas afecta de manera importante en la radiación disponible en la cara posterior.
3. Para el caso de las cebollas, se tiene:

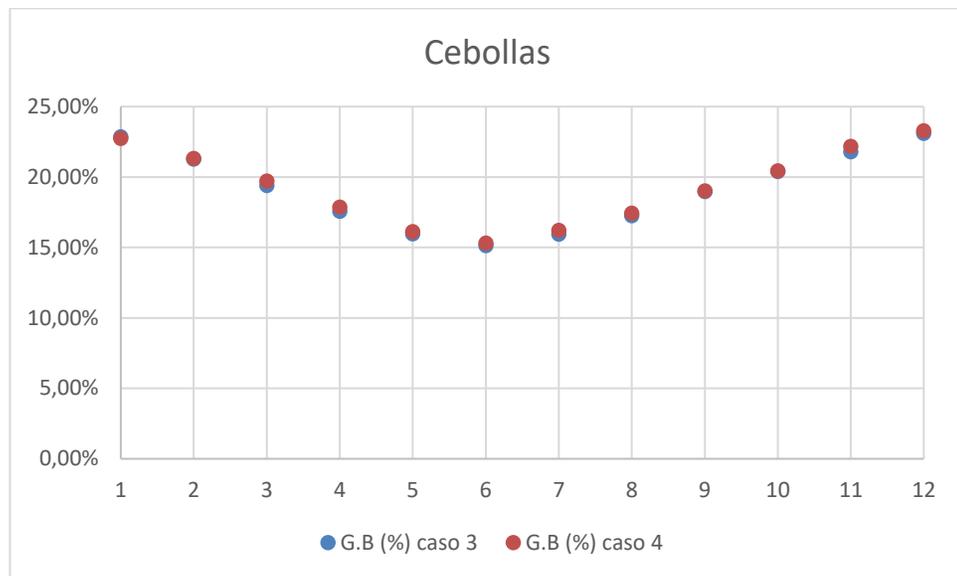


Figura 69. Evolución ganancia bifacial en el año. Caso 3 y 4.

- a. Al igual que con la superficie de berenjenas, la radiación disponible en la cara frontal es siempre mayor para el caso 4 (NSRDB), Este efecto se explica también por el nivel de radiación (GHI) contenido en cada base de datos.
  - b. La ganancia bifacial es mayor también para el caso 4, con datos provenientes de la NSRDB. Al igual que en el caso de las berenjenas, esto se explica por la mayor componente difusa.
  - c. La ganancia bifacial también muestra dependencia de la posición del Sol durante el año. Al no haber variaciones importantes en la configuración de los suelos, la evolución no se ve interrumpida.
4. Considerando los datos a nivel anual, se tiene que la radiación extra disponible en la cara posterior del panel se encuentra entre 29,28% y 29,49% para el caso de berenjenas y entre 19,41% y 19,52%. Lo anterior se resume en que la superficie de berenjenas produce entre un 50,8 y 51% extra comparado con el caso de cebollas.

### 6.2.2. Generación de corriente directa (DC)

A su vez, también fue obtenida la producción energética anual (kWh/año) para cada uno de los casos descritos. Este cálculo es realizado por la herramienta de simulación, tomando como inputs los valores de radiación efectiva en POA y las pérdidas establecidas para la componente DC. En los gráficos que siguen se detalla la producción de energía mensual para cada caso y posteriormente, en las Tabla 27 y Tabla 28 se presentan los valores anuales a nivel de panel (DC).

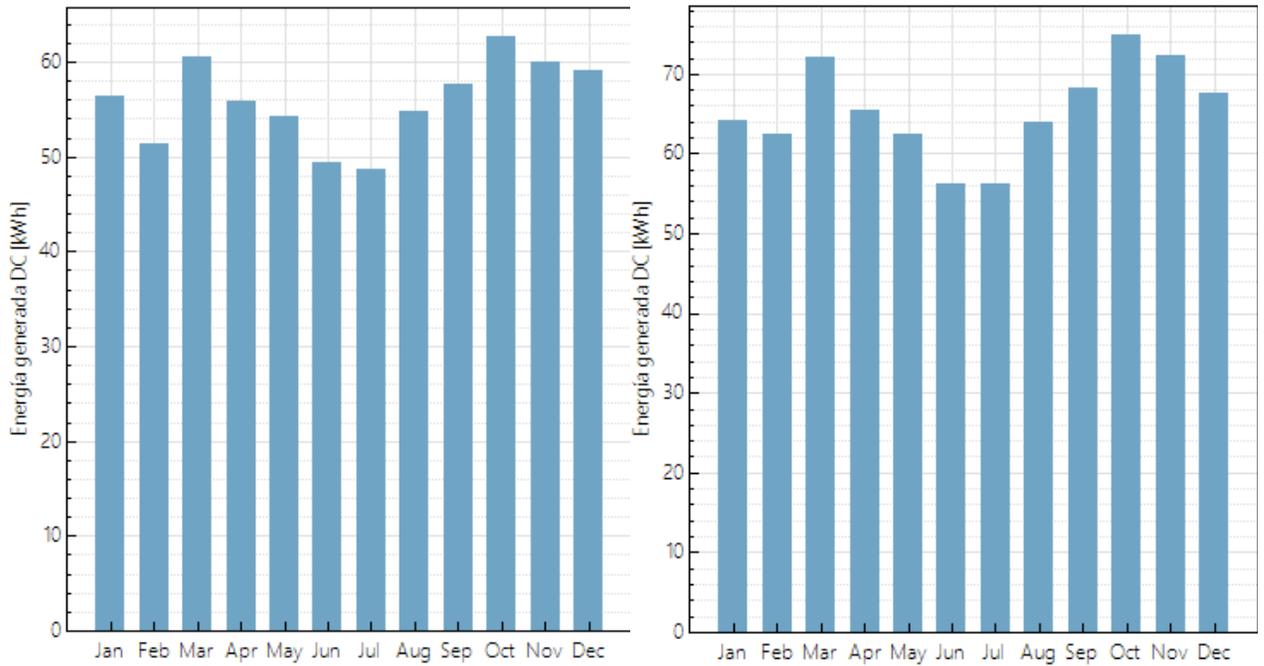


Figura 70. Comparación generación DC mensual para el caso 1. Configuración monofacial (izq.) y bifacial (der.)

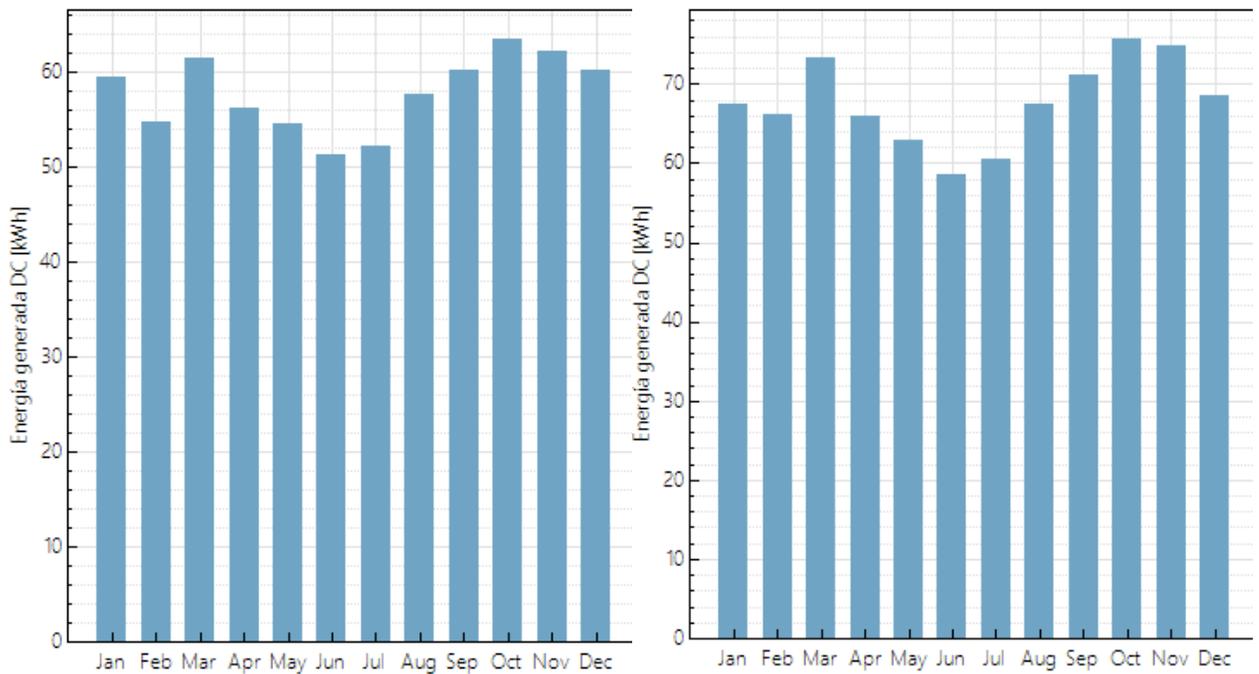


Figura 71. Comparación generación DC mensual para el caso 2. Configuración monofacial (izq.) y bifacial (der.)

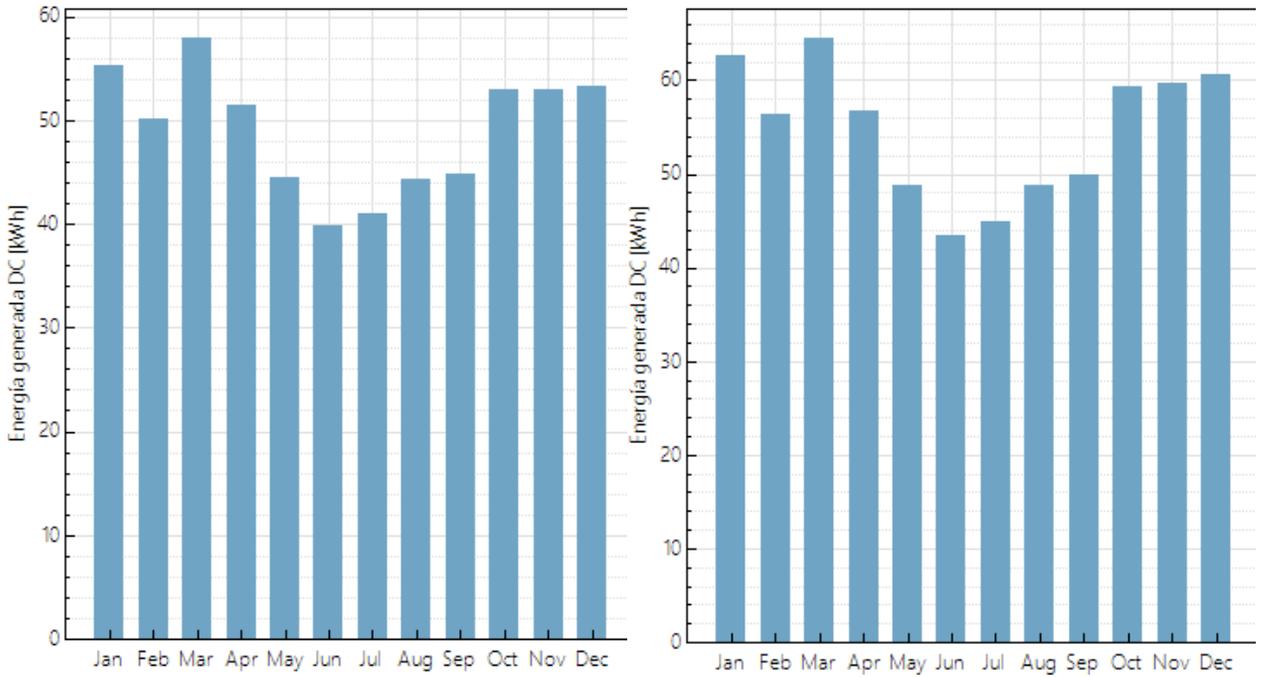


Figura 72. Comparación generación DC mensual para el caso 3. Configuración monofacial (izq.) y bifacial (der.)

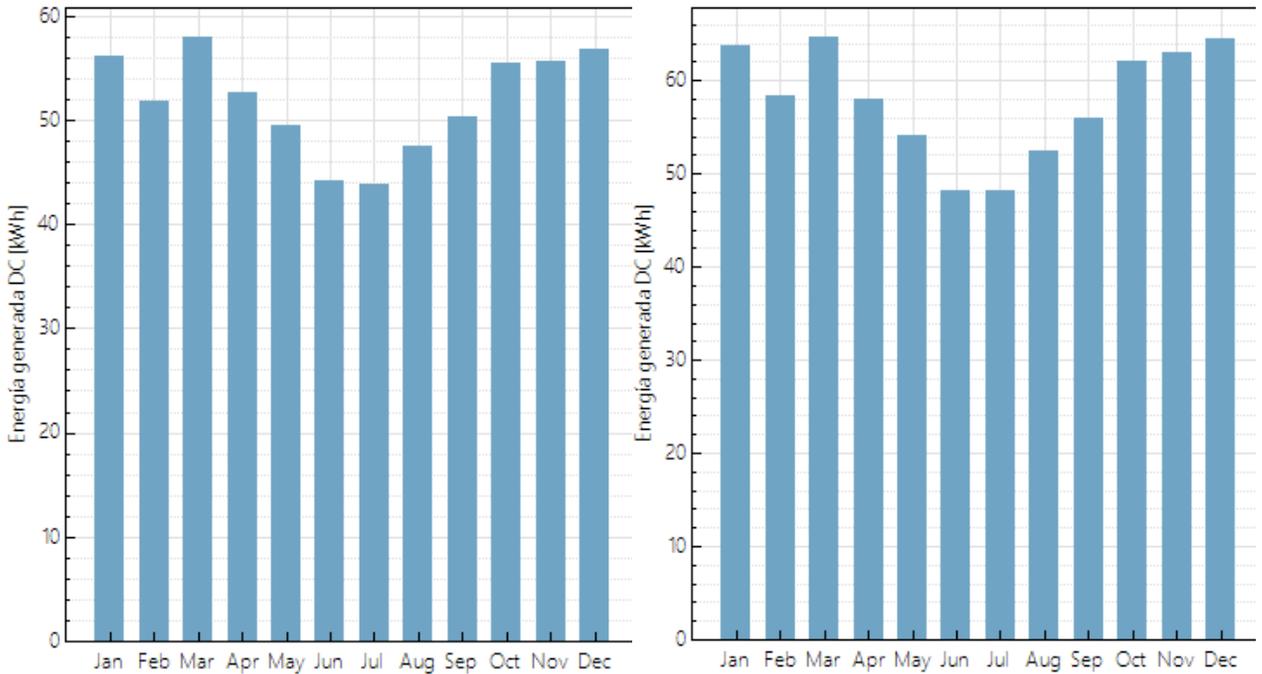


Figura 73. Comparación generación DC mensual para el caso 4. Configuración monofacial (izq.) y bifacial (der.)

De acuerdo con la generación mensual presentada en los gráficos de barra, se identifica lo siguiente:

1. Para cada caso, la producción energética DC es mayor para la configuración bifacial, tal y como se espera.
2. Las distribuciones de generación energética a lo largo del año no sufren modificaciones al agregarse la componente bifacial. Es decir, la energía generada por la cara posterior no modifica la distribución de generación producida por la configuración monofacial, simplemente eleva los valores. Esto se mantiene también, al variar la fuente de datos.
3. Para el caso de berenjenas, los meses más productivos son octubre, marzo y noviembre respectivamente. Estos meses presentan los mayores valores de radiación disponible en la cara frontal y ganancia bifacial de radiación en POA.
4. Con respecto a los instalados sobre cebollas (3 y 4), los meses de mayor generación son: marzo, enero y diciembre, respectivamente. En esta configuración, estos tres también corresponden a los casos de mayor recurso disponible en la cara frontal y de ganancia bifacial de acuerdo con la tabla 26.

Tabla 27. Energía eléctrica producida por las distintas configuraciones para el panel FV de estudio.

Cultivo	Configuración	Energía anual (kWh dc)		Ganancia bifacial energética (%)		
		Datos Solar	Exp NSRDB	Datos Solar	Exp	Datos NSRDB
Berenjenas	Monofacial	670,92	692,81	-	-	-
	Bifacial	785,86	812,15	17,13		17,23
Cebollas	Monofacial	588,43	621,75	-	-	-
	Bifacial	655,61	693,18	11,42		11,49

Tabla 28. Energía eléctrica producida por las distintas configuraciones para el panel FV de mayor bifacialidad.

Cultivo	Configuración	Energía anual (kWh dc)		Ganancia bifacial energética (%)		
		Datos Solar	Exp NSRDB	Datos Solar	Exp	Datos NSRDB
Berenjenas	Monofacial	670,92	692,81	-	-	-
	Bifacial	823,71	851,44	22,77		22,90
Cebollas	Monofacial	588,43	621,75	-	-	-
	Bifacial	677,84	716,82	15,19		15,29

1. La producción energética anual es mayor para el panel instalado sobre berenjenas que sobre cebollas, para todas las configuraciones probadas. Además, la ganancia bifacial energética. Lo anterior es consecuente con lo registrado para la ganancia bifacial de radiación en POA.
2. La superficie representativa de berenjenas permite aportar entre un 17,13 y un 17,23% extra a la generación monofacial. El cultivo de cebollas, por su lado,

permite incrementar la producción entre un 11,42 y un 11,49%. Lo anterior se traduce en un incremento para la superficie de berenjena entre un 49,9 y 50% de lo generado por la superficie de cebollas.

3. Los valores de ganancia bifacial energética corresponden aproximadamente a un 60% de los valores de ganancia bifacial de radiación, lo cual se explica por el factor de bifacialidad
4. Para el caso presentado en la tabla 29, se tiene que un factor de bifacialidad de 80% (33,3% mayor que el del panel seleccionado) implica que la ganancia bifacial de la superficie de berenjenas experimente un aumento de entre un 32,90% y 32,92%. El caso de la superficie de cebollas registra un incremento del 33,01%-33,07%. Esto demuestra, para este caso particular, características de una dependencia lineal entre el factor de bifacialidad y la ganancia bifacial.

### 6.2.3. Generación corriente alterna (AC)

Los datos de generación AC no corresponden al principal objetivo de este trabajo de investigación, sin embargo son presentados para permitir una estimación de los parámetros de balance energético presentes comúnmente en una planta fotovoltaica, tales como factor de capacidad, rendimiento energético y performance ratio.

Tabla 29. Energía AC anual y rendimiento obtenidos.

Cultivo	Configuración	Energía anual (kWh ac)		Rendimiento energético (kWh/kW)		
		Datos Solar	Exp NSRDB	Datos Solar	Exp	Datos NSRDB
Berenjenas	Monofacial	630,98	652,08	1987		2053
	Bifacial	739,57	812,15	2329		2408
Cebollas	Monofacial	552,19	584,95	1739		1842
	Bifacial	615,64	652,62	1939		2055

Tabla 30. Factor de capacidad y performance ratio obtenidos.

Cultivo	Configuración	Factor de capacidad		Performance ratio (%)		
		Datos Solar	Exp NSRDB	Datos Solar	Exp	Datos NSRDB
Berenjenas	Monofacial	22,70	23,40	0,79		0,78
	Bifacial	26,60	27,50	0,92		0,91
Cebollas	Monofacial	19,80	21,00	0,79		0,77
	Bifacial	22,10	23,50	0,89		0,86

## Capítulo 7: Conclusiones

Este trabajo ha demostrado, en primer lugar, que la metodología propuesta corresponde a un proceso válido para la estimación del albedo producido por superficies agrícolas, verificando su formulación con los resultados obtenidos en dos localidades del valle de Lluta. El proceso expuesto en este trabajo de título consigue identificar e incluir satisfactoriamente todos los factores de interés presentes en los suelos agrícolas reales, seguido del establecimiento de las relaciones que permiten combinarlos, lo cual hace posible la estimación final y adecuada del albedo generado por cada suelo. Lo anterior posibilita la posterior evaluación de la componente energética del sistema agrovoltaico bifacial, al ser instalado sobre los suelos del Valle de Lluta.

Por medio de los resultados aquí obtenidos, se establece que los sistemas APV bifaciales en el valle de Lluta presentan valores de generación eléctrica a priori interesantes. Sin embargo, la real valoración final de estos dependerá de cada proyecto en particular y debe ser discutido agregando un análisis económico, entre otros.

En particular, se logró representar adecuadamente los suelos a utilizar, considerando tanto la existencia de distintos componentes, la ubicación geográfica de la zona, las técnicas de manejo particulares empleadas y su consecuente evolución a lo largo del tiempo. Estos aspectos son incluidos dentro de las superficies representativas sobre las que se trabaja, las que en consecuencia corresponden a aproximaciones válidas de lo encontrado en los terrenos de Izzamar Cayo y Edgard Salvador y permiten la estimación del carácter reflectivo de cada uno.

Con relación a la primera etapa de este estudio, la referente a las pruebas realiadas en terreno, se concluye lo siguiente:

1. Ante la imposibilidad de medir directamente la radiación reflejada por los cultivos, la principal fuente de incertidumbre de este trabajo proviene de la suposición que establece el valor fijo del albedo generado por los productos agrícolas, como 24%. Este valor permite obtener una estimación válida de la generación eléctrica de sistemas APV sobre suelos del valle de Lluta. Si se busca aumentar la exactitud de los resultados, la medición directa del albedo generado por el cultivo debe ser realizada.
2. Gracias al proceso de medición, el cual fue satisfactoriamente desarrollado entre el 28/09 y el 11/12 del 2019, fue obtenido que el plástico agrícola presenta mayores niveles de reflexión, al promediar un albedo corregido de 51,83%. Lo anterior corresponde a un aumento del 77,87% con respecto a lo promediado por el suelo desnudo (29,14%). Por ende, la utilización del plástico agrícola favorece la producción de energía solar.
3. En este trabajo se prefiere el concepto de albedo corregido con respecto a su nivel de irradiancia, a fin de reducir la influencia del efecto producido a comienzo y final del día. El bajo ángulo de elevación solar produce altos valores de albedo pero con bajo contenido energético en comparación a otros momentos del día.
4. El albedo del plástico agrícola evidencia un decrecimiento, causado por la propia degradación del material y el ensuciamiento generado al estar expuesto a la intemperie. No se consigue aislar este efecto, por lo que produce

incertidumbre en los resultados finales, al formar parte de los datos utilizados para la creación del modelo estimador de albedo.

5. Si bien los valores registrados, en particular de radiación incidente GHI, sirven para validar el proceso de medición, se detecta la existencia de una incertidumbre en los valores de albedo asociada a posibles efectos cruzados, en los cuales la luz reflejada por un material podría potencialmente afectar las mediciones del albedómetro contiguo. Este punto es discutido en la sección de Trabajo futuro.

Por otro lado, el modelo estimador de albedo cumple con su principal objetivo. Con respecto a esto, se comprueba la dependencia de radiación reflejada por cada superficie de las variables independientes propuestas: ángulo azimutal, ángulo cenital y radiación incidente.

Fue comprobado también que la disposición espacial de los suelos representativos tiene un impacto sobre la generación de albedo. Este efecto fue exitosamente modelado por mediante la formulación de un algoritmo utilizando el factor de visión, el cual varía de acuerdo a la ubicación y tamaño de cada componente a lo largo del tiempo. Al respecto, puede asegurarse lo siguiente:

1. El método de Monte Carlo es apropiado para estimar la evolución del factor de visión, dada su dependencia directa del cambio de área de cada componente.
2. La exclusión de la variación de altura en el proceso de cálculo, genera una incertidumbre sobre los resultados finales de albedo de cada superficie. Este tema es discutido en la sección de trabajo futuro, específicamente en el punto 7.1.4.

Lo anterior permite la obtención exitosa del albedo local, en función del tiempo, para ambas localidades del Valle de Lluta.

1. El albedo, al corresponder a una propiedad del suelo, no se ve afectado mayormente por el origen de los datos meteorológicos.
2. El albedo local final registrado por medio de la metodología propuesta corresponde a una estimación válida. Lo anterior ya que sus valores se condicen con lo registrado en las mediciones obtenidas en la PFV El Águila. Además, sus variaciones son consistentes y se explican por la evolución del tamaño de cultivos, los componentes presentes en la superficie y la composición de la radiación incidente, teniendo la radiación difusa una mayor importancia sobre la generación de albedo.
3. El albedo final es mayor para el caso de la superficie de berenjenas, debido principalmente a la presencia del plástico agrícola. Los meses en que no se encuentra instalado este material, los valores de albedo son prácticamente iguales entre las dos superficies.

De manera final, la simulación por medio de la herramienta SAM logra entregar una representación de la generación energética ante las condiciones presentes sobre ambos suelos. Así, se concluye lo siguiente:

1. El cultivo de berenjena presenta siempre mayor disponibilidad de radiación que el generado por el de cebollas, tanto en la cara frontal como en la posterior

del panel. Esto se debe al mayor recurso solar presente en esa localidad y al mayor nivel de albedo producido por esa superficie.

2. La radiación extra en la cara posterior del panel en ambos casos depende principalmente de la posición del Sol a lo largo del año. Así, la ganancia bifacial de radiación es mayor para los meses donde el Sol se ubica al sur del valle, particularmente durante los meses entre noviembre y febrero. Además se tienen mayores niveles de ganancia bifacial para los datos provenientes de la NSRDB, debido a la mayor componente difusa de la radiación.
3. Las superficies escogidas del valle de Lluta generan una disponibilidad de radiación en la cara trasera de entre 29,28% y 29,49% para el caso de berenjenas y entre 19,41% y 19,52% para las cebollas. La superficie de berenjenas produce entre un 50,8 y 51% adicional al producido por la de cebollas.
4. Lo anterior se traduce en un aumento de la producción energética DC que se encuentra entre el 17,13 y un 17,23% para la superficie de berenjenas en comparación con la configuración monofacial. Este aumento se establece entre un 11,42 y un 11,49% para el caso del cultivo de cebollas. Lo anterior se traduce en un incremento del 49,9 a 50% del cultivo de berenjenas con respecto al producido por el de cebollas.

## **7.1. Trabajo futuro**

Con el objetivo de complementar el trabajo aquí presentado, por medio de mejoras o inclusión de puntos no abordados, las siguientes directrices para un trabajo futuro son presentadas:

### **7.1.1. Consideración n°1:**

Para poder obtener una completa caracterización del comportamiento reflectivo de cada material, se propone la evaluación de la componente agrícola por medio de los mismos procedimientos aquí descritos para el plástico y la tierra. En caso de realizar esto, un modelo estimador debe ser desarrollado de manera similar al presentado en la sección 5.2.2.

### **7.1.2. Consideración n°2:**

Para el proceso de medición de datos en sitio, se sugiere confirmar la altura correcta ideal para la instalación del piranómetro, esto de acuerdo con el área cubierta por el material. Lo anterior, con el fin de evitar posibles efectos cruzados entre los piranómetros y los materiales contiguos. Para esto puede trabajarse con el mismo método de Monte Carlo.

### **7.1.3. Consideración n°3:**

Con respecto al modelo estimador de reflexión se plantea la posibilidad de incluir nuevos parámetros que permitan un mayor ajuste entre la radiación medida y la estimada. Aquí se propone diferenciar la radiación entre sus componentes directa y difusa (lo cual requeriría la inclusión de otros equipos de medición) o incluir la temperatura en caso de ser adecuado.

#### **7.1.4. Consideración n°4:**

Referente al estudio de la distribución espacial, tres puntos complementarios para este estudio son identificados. En primer lugar se propone analizar la influencia de la altura de instalación sobre los factores de visión. En segundo lugar se plantea definir el tamaño correcto de una superficie representativa para poder englobar el 100% de radiación que llega al panel. Por último, para una mayor exactitud en el cálculo de los factores de visión generados por los cultivos resulta necesaria la inclusión de la altura de los productos agrícolas dentro del cálculo mediante el Método de Monte Carlo.

#### **7.1.5. Consideración n°5:**

Resulta también de interés la evaluación de los posibles impactos de la generación de sombra sobre los cultivos aquí trabajados. Esto corresponde al enfoque complementario al que se le ha dado a este trabajo, con el fin de obtener el panorama completo del impacto de sistemas agrovoltaicos.

#### **7.1.6. Consideración n°6:**

Por último, la simulación de los distintos casos sobre suelo desnudo entregaría los reales aportes de una configuración bifacial sobre tierras agrícolas en contraste con la superficie más común para la instalación de sistemas FV correspondiente a tierra descubierta.

## Bibliografía

- [1] European Commission, *Global Food Supply and Demand: Consumer Trends and Trade Challenges*, 2019.
- [2] J. Delong y O. Burger, «Socio-Economic Instability and the Scaling of Energy Use With Population Size,» *PLOS One*, 2015.
- [3] International Energy Association, «World Energy Outlook 2019 Summary,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-power-generation-capacity-by-source-in-the-stated-policies-scenario-2000-2040>.
- [4] D. Ketzer, N. Weinberger, C. Rösch y S. Stephanie, «Land use conflicts between biomass and power production – citizens’ participation in the technology development of Agrophotovoltaics,» *Journal of Responsible Innovation*, 2019.
- [5] M. Elborg, «Reducing Land Competition for Agriculture and Photovoltaic Energy Generation – A Comparison of Two Agro-Photovoltaic Plants in Japan,» 2017.
- [6] Solar Novus Today , «Agrophotovoltaics Goes Global: From Chile to Vietnam,» [En línea]. Available: [https://www.solarnovus.com/agrophotovoltaics-goes-global-from-chile-to-vietnam\\_N11570.html](https://www.solarnovus.com/agrophotovoltaics-goes-global-from-chile-to-vietnam_N11570.html).
- [7] T. Mai, «Technology Readiness Level,» NASA, 07 08 2017. [En línea]. Available: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt\\_accordion1.html](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html). [Último acceso: 28 04 2020].
- [8] NASA, «Technology Readiness Level,» 2015. [En línea]. Available: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt\\_accordion1.html](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html).
- [9] J. Xue, «Photovoltaic agriculture - New opportunity for photovoltaic applications in China,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 1-9, 2017.
- [10] The Center for agriculture, food and the environment, «Dual-use: Agriculture and Solar Photovoltaics,» *Clean Energy Extension*, 2019.
- [11] M. D. Raigón, M. D. G. Martínez, C. Guerrero, P. Esteve y A. Domínguez-Gento, «Influencia de la asociación de cultivo sobre la relación equivalente de suelo,» de *VII Congreso SEAE* , Zaragoza, 2006.
- [12] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier y Y. Ferard, «Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes,» *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2725-2732, 2011.
- [13] S. Amaducci, X. Yin y M. Colauzzi, «Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production,» *Applied Energy*, vol. 220, pp. 545-561, 2018.
- [14] S. Schindele y K. Schneider, «Agrophotovoltaics: high harvesting yield in hot summer of 2018,» Fraunhofer ISE, 12 04 2019. [En línea]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press->

- releases/2019/agrophotovoltaics-high-harvesting-yield-in-hot-summer-of-2018.html. [Último acceso: 09 10 2019].
- [15] R. E. Blankenship, D. M. Tiede, J. Barber, G. W. Brudvig, G. Fleming, M. Ghirardi, M. R. Gunner, W. Junge, D. M. Kramer, A. Melis, T. A. Moore, C. C. Moser, D. G. Nocera, A. J. Nozik, D. R. Ort, W. W. Parson, R. C. Prince y R. T. Sayre, «Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement,» *Science*, vol. 332, 2011.
- [16] B. Jr. y H. DO., «The maximum efficiency of photosynthesis,» *Photochemistry and Photobiology*, vol. 8, pp. 53-545, 1991.
- [17] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, «PHOTOVOLTAICS REPORT,» ISE Fraunhofer, Freiburg, 2019.
- [18] E. H. Adeh, S. P. Good y M. C. & C. W. Higgins, «Solar PV power potential is greatest over croplands,» *Nature Scientific Reports*, 2019.
- [19] A. Weselek, A. Ehmann, S. Zikeli, I. Lewandowski, S. Schindele y P. Högy, «Agrophotovoltaic systems: applications, challenges and opportunities. A review,» *Agronomy for sustainable development*, vol. 39, pp. 35-55, 2019.
- [20] C. Meyer, «Agro PV- Next2Sun's vertical installations,» de *6th BifiPV Workshop*, Amsterdam, 2019.
- [21] G. Barron-Gafford, M. Pavao-Zuckerman, R. Minor, L. Sutter, I. Barnett-Moreno, M. T. D. Blackett, K. Dimond, A. Gerlak, G. Nabhan y J. Macknick, «Agrivoltaic provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands,» *Nature Sustainability*, vol. 2, 2019.
- [22] G. R. W. M. Ehret M, «The effect of shade and shade material on white clover/perennial ryegrass mixtures for temperate agroforestry systems,» *Agrofor Syst*, vol. 89, pp. 557-570, 2015.
- [23] E. Bellini, «Food crops do better in the shade of solar panels,» *PV-Magazine*, 03 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2019/09/03/food-crops-do-better-in-the-shade-of-solar-panels/>. [Último acceso: 07 Octubre 2019].
- [24] H. Marrou, J. Wery, L. Dufour y C. Dupraz, «Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels,» *European Journal of Agronomy*, vol. 44, pp. 54-66, 2013.
- [25] J. Movellan, «Japan Next- Generation farmers cultivate crops and solar energy,» *Renewable Energy World*, 10 10 2013. [En línea]. Available: [<https://www.renewableenergyworld.com/2013/10/10/japan-next-generation-farmers-cultivate-agriculture-and-solar-energy/#gref>]. [Último acceso: 04 10 2019].
- [26] A. P. Robert L. McGraw, P.-d. F. W. Terrell Stamps y a. M. J. Linit, «YIELD AND MATURATION OF ALFALFA IN A BLACK WALNUT ALLEY-CROPPING PRACTICE,» *Agroforestry systems*, 2008.
- [27] REM TEC, «AGROVOLTAICO,» REM TEC, [En línea]. Available: <http://www.remtec.energy/en/agrovoltaico-2/>. [Último acceso: 27 09 2019].
- [28] Trinasolar, «Instalación pesquera Xiangshui,» Trinasolar, 2019. [En línea]. Available: <https://www.trinasolar.com/lac/resources/success-stories/xiangshui-fishery-installation>. [Último acceso: 27 09 2019].

- [29] Fraunhofer, «Concepto agro PV y su aplicación en el sector hortalizas en la Región Metropolitana de Santiago,» Fraunhofer Chile Research, Santiago, 2015.
- [30] D. L. W. J. Marrou H, «How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system?,» *Eur J Agron*, vol. 50, pp. 38-51, 2013.
- [31] E. Bellini, «La FV en agricultura como solución para regiones áridas,» Fraunhofer, 23 04 2019. [En línea]. Available: <https://www.pv-magazine-latam.com/2019/04/23/la-fv-en-agricultura-como-solucion-para-la-regiones-aridas/>, . [Último acceso: 10 10 2019].
- [32] T. S. Liang, M. Pravettoni, C. Deline, J. S. Stein, R. Kopecek, J. Prakash, W. Luo, Y. Wang, A. G. Aberle y Y. S. Khoo, «A review of crystalline silicon bifacial photovoltaic performance characterisation and simulation,» *Energy & Environmental Science*, vol. 12, pp. 116-148, 2019.
- [33] M. Hutchins, «PV Magazine,» 04 11 2019. [En línea]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2019/11/04/longi-demonstrates-20-bifacial-boost/>. [Último acceso: 10 11 2019].
- [34] A. Huebner, A. G. Aberle y R. Hezel, «Temperature behavior of monofacial and bifacial silicon solar cells,» de 26. *IEEE photovoltaic specialists conference*, Anaheim, CA (United States), 1997.
- [35] R. Satpathy, «Additional energy yield suing bifacial solar PV modules & dependency on albedo,» [En línea]. Available: [https://www.ises.org/sites/default/files/webinars/Presentation%20Rabi%20oSatpathy\\_ISESWebinar\\_o.pdf](https://www.ises.org/sites/default/files/webinars/Presentation%20Rabi%20oSatpathy_ISESWebinar_o.pdf). [Último acceso: 30 10 2019].
- [36] A. Asgharzadeh, T. Lubenow, J. Sink, B. Marion, C. Deline, C. Hansen, J. Stein y F. Toor, «Analysis of the impact of installation parameters and system size on bifacial gain and energy yield of PV systems,» *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, n° 3, pp. 798-805, 2018.
- [37] RADSITE, «RADIANCE detailed description,» Radiance, 14 August 2016. [En línea]. Available: <https://www.radiance-online.org/archived/radsite/radiance/refer/long.html>. [Último acceso: 23 10 2019].
- [38] T. C. R. Russell, R. Saive, A. Augusto, S. G. Bowden y H. A. Atwater, «The influence of spectral albedo on bifacial solar cells: a theoretical and experimental study,» *IEEE Journal of photovoltaics*, vol. 7, n° 6, pp. 1611-1617, 2017.
- [39] P. Caballero, P. Hanustiak y L. Fanego, «SolarGIS,» 19 11 2019. [En línea]. Available: <https://solargis.com/blog/product-updates/surface-albedo-most-frequent-questions>. [Último acceso: 13 02 2020].
- [40] C. E. Valdivia, C. T. Li, A. Russell, J. E. Haysom, R. Li, D. Lekx, M. M. Sepeher, D. Henes, K. Hinzer y H. P. Schriemer, «Bifacial Photovoltaic Module Energy Yield Calculation and Analysis,» de *IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington, DC, USA, 2017.
- [41] I. Romijn, «Bifacial solar cells - a brief overview,» de *BifiPV Workshop*, Konstanz, Germany, 2017.
- [42] C. Durán, «Bifacial solar cells: high efficiency design, characterization, modules and applications,» Universität Konstanz, Konstanz, 2012.

- [43] R. G. Lemus, R. Vega, T. Kim, A. Kimm y L. E. Shephard, «Bifacial solar photovoltaics - A technology review,» *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 60, pp. 1533-1549, 2016.
- [44] SACLIMA Solar Fotovoltaica, «Módulos PERC: ¿Por qué son más eficientes que los convencionales?,» SACLIMA Solar Fotovoltaica, 03 04 2018. [En línea]. Available: <http://www.saclimafotovoltaica.com/3-ventajas-celdas-perc/>. [Último acceso: 28 10 2019].
- [45] PV Education.org, «High Efficiency solar cells,» PV Education.org, 2019. [En línea]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/high-efficiency>. [Último acceso: 30 10 2019].
- [46] K. S. Chan, «What is a PERT solar cell?,» Kschan, 21 07 2019. [En línea]. Available: <https://www.kschan.com/what-is-a-pert-solar-cell/>. [Último acceso: 20 10 2019].
- [47] A. T. H. y E. A. H., «El problema de salinidad en los recursos suelo y agua ue afectan el riego y culivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile,» *IDESIA*, vol. 26, n° 3, pp. 31-44, 2008.
- [48] Jica, «El estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile,» *Informe Principal Dirección de Agua en la Parte Norte de Chile*, p. 52, 1995.
- [49] H. Subiabre, A. Villablanca y J. Otárola, «Generalidades del cultivo de cebolla en Lluta,» *Informativo INIA-URURI*, vol. 57, n° Agricultura, pp. 2-3, 2011.
- [50] A. Aljaro y H. Subiabre, «Cebollas,» *Informativo Oficina técnica INIA-URURI*, vol. 10, n° Agricultura, pp. 2-4, 2009.
- [51] G. Nellis y S. Klein, «The Monte Carlo Method,» de *Heat Transfer*, New York, Cambridge University Press., 2009.
- [52] Sun'Agri, «Benefits of bifacial PV panels for agrivoltaics,» de *BifIPV Workshop*, Amsterdam, 2019.
- [53] v. S. J. N.-T. N. L. C.-H. J. S. G. H. Pang K, «Responses of legumes and grasses to non-, moderate, and dense shade in Missouri, USA. I. Forage yield and its species-level plasticity,» *Agrofor Syst*, vol. 88, p. 287, 2017.
- [54] A. Cuevas, A. Luque, J. Eguren y J. d. Alamo, «50% percent more output power from an albedo-collecting flat panel using bifacial solar cells,» *Solar Energy*, vol. 29, n° 5, pp. 419-420, 1982.
- [55] I. L. Guerrero, «Repositorio UTN,» 2010. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/156/5/03%20REC%2068%20Anexo%206%20Normas%20Riverside.pdf>. [Último acceso: 08 11 2019].
- [56] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), «Photovoltaics Report,» Fraunhofer, Freiburg, 2019.
- [57] «SunCalc,» [En línea]. Available: <https://www.suncalc.org/#/-18.3971,-69.6514,10/2019.11.16/22:34/1/3>. [Último acceso: 03 04 2020].



# ANEXOS

## 7.2. Plásticultura

Se identifica la utilización de la plásticultura en las actividades del valle de Lluta. En particular, en esta zona esta actividad no se encuentra desarrollada al mismo nivel que en el caso del valle de Azapa, debido al desarrollo alcanzado por las razones antes estipuladas. En el sector de Lluta fue posible encontrar aplicaciones de plásticultura para cultivos de berenjena y ají en su formato mulch, y para tomate en configuraciones de invernaderos.

El uso de materiales plásticos como aporte a las actividades agrícolas data desde el año 1948, cuando por primera vez fueron implementados, en lugar de vidrio, en un invernadero por el profesor E. M. Emmert. Los plásticos han ganado interés y un espacio importante en el mercado agrícola debido a la gran cantidad de funciones que ofrecen sobre los cultivos. Ventajas como protección mecánica ante agentes externos, aislamiento térmico y potencial manejo de la luz incidente, son agregadas a los cultivos a cambio de un bajo precio y un fácil procesamiento. El uso de la plásticultura ha llegado actualmente al uso de 3,9 millones de toneladas a nivel mundial, contabilizando todas las distintas aplicaciones que actualmente ofrecen estos materiales, de las cuales las principales son presentadas a continuación:

- 1. Mulch:** Consiste en cubrir el suelo con diversos materiales para evitar el crecimiento de malezas no deseadas. Antes de la inclusión de los plásticos, múltiples materiales han sido utilizados incluso desde tiempos antiguos (2500-3000 años A.C). El uso de plásticos mantiene el suelo seco y libre de la erosión causada por la lluvia, además, bloquea la radiación incidente evitando el crecimiento de otras plantas.
- 2. Invernadero:** Este corresponde al método más común de utilización de plásticos en la agricultura. Consiste en espacios cerrados, estáticos y accesibles donde cubiertas exteriores de plástico (o vidrio) se encargan de modificar y preservar las condiciones ambientales como temperatura y humedad, del modo más útil para favorecer a los cultivos que están al interior.
- 3. Low tunnel:** Consiste en pequeños invernaderos que cubren los cultivos al nivel del suelo. Estas estructuras son utilizadas para mantener el calor proveniente del sol y generar una atmosfera local de mayor temperatura sobre la planta, lo cual genera crecimiento temprano de semillas, producción fuera de temporada y reducción de tratamientos químicos sobre la planta, entre otras ventajas. Los túneles además protegen al cultivo de condiciones externas que puedan dañarlo tales como animales, lluvia y bajas temperaturas.



Los productos utilizados en la plasticultura consisten en tres principales componentes, dentro de los cuales existe una variada disponibilidad otorgando las características de diferentes productos disponibles para plasticultura se diferencian en cualquiera de sus tres principales componentes.

1. **Polímeros:** Son la parte principal del producto y corresponde a polímeros termoplásticos. El más utilizado actualmente es el Polietileno (PE), seguido del PVC, PP y PC.
2. **Aditivos:** Químicos incluidos dentro del polímero base y que modifican sus propiedades. En plasticultura son incluidos anti-oxidantes, estabilizadores UV, colorantes, reflectores/absorbedores IR, antivaho, etc.
3. **Revestimientos:** Aplicados externamente para modificar las propiedades de la superficie.

### 7.3. Transformación a tiempo solar

La relación entre el tiempo estandarizado de cada zona horaria y el LST se define como el factor de corrección del tiempo (TC).

$$TC = 4(Longitud - LSTM) + EoT$$

Donde,

- El factor de 4 se debe al hecho de que la Tierra rota  $1^\circ$  cada 4 minutos aproximadamente.
- *Longitud*: longitud de la locación particular.
- *LSTM*: Local Standard Time Meridian o el meridiano usado como referencia para cada zona horaria. Como se cuenta con 24 zonas horarias en nuestro planeta, los meridianos referenciales se definen cada  $15^\circ$  desde el meridiano de Greenwich.
- *EoT*: denominada Ecuación del Tiempo, corresponde a una relación empírica que corrige el tiempo en base a la excentricidad de la órbita y la inclinación del eje de la Tierra.

$$EoT = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B)$$

Con,

$$B = \frac{360}{365}(d - 81)$$

Con d: día del año.

Así, se obtienen los valores medidos de radiación incidente y reflejada de acuerdo al tiempo solar local.

#### RHI/GHI vs LST

Para el cálculo de los ángulos de interés resulta necesaria la previa obtención de una lista de parámetros que se definen como sigue:

- **Ángulo horario (HRA)**: señala la cantidad de grados que el Sol se mueve a través del cielo. Por definición el ángulo horario es  $0^\circ$  al mediodía solar.

$$HRA = 15^\circ(LST - 12)$$

- **Ángulo de declinación ( $\delta$ )**: varía estacionalmente de acuerdo a la inclinación del eje de la Tierra y cómo este afecta durante el año a la cercanía con el Sol.

$$\delta = -23,45^\circ \sin\left(\frac{360}{365}(d + 284)\right)$$

- Ángulo de elevación ( $\alpha$ ): también denominado ángulo de altura, describe la altura angular del Sol en el cielo. Su valor es de  $0^\circ$  al amanecer y  $90^\circ$  al mediodía.

$$\alpha = \arcsin[\sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(HRA)]$$

Con  $\varphi$ : latitud de la locación

- Ángulo azimutal (AZI): representa la dirección en el plano desde la cual proviene la luz solar. En este trabajo se acepta la convención de 0 a  $360^\circ$  en sentido horario, tomando como referencia  $0^\circ$  al norte.

$$Azi = \arccos \left\{ \frac{\sin(\delta) \cos(\varphi) - \cos(\delta) \sin(\varphi) \cos(HRA)}{\cos(\alpha)} \right\}$$

La ecuación anterior solo entrega el valor correcto para la mañana solar, por lo que se debe realizar el siguiente ajuste

$$\begin{aligned} AZI &= Azi; \text{ si } LST < 12 \\ AZI &= 360^\circ - Azi; \text{ si } LST > 12 \end{aligned}$$

- Ángulo cenital ( $\zeta$ ): define al ángulo entre la elevación del Sol y la vertical. Corresponde al ángulo complementario del ángulo de elevación.

$$\zeta = 90^\circ - \alpha$$

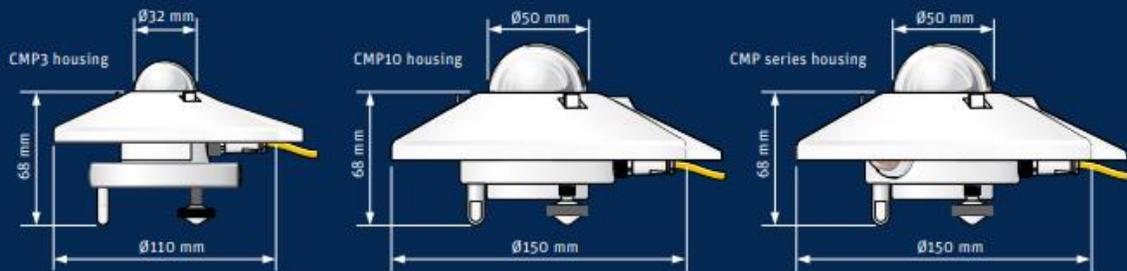
## 7.4. Norma de Riverside

C <sub>1</sub>	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.
C <sub>2</sub>	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
C <sub>3</sub>	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C <sub>4</sub>	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C <sub>5</sub>	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.
C <sub>6</sub>	Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.
S <sub>1</sub>	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
S <sub>2</sub>	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario
S <sub>3</sub>	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
S <sub>4</sub>	Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

Figura 74. Norma de Riverside: para evaluación de la calidad de las aguas de riego [47].

## 7.5. Fichas técnicas (datasheets)

### 7.5.1. Piranómetro CMP10 Kipp&Zonen



Specifications	CMP 3	CMP 6	CMP10 & CMP 11	CMP 21	CMP 22
Classification to ISO 9060:1990	Second Class	First Class	Secondary Standard	Secondary Standard	Secondary Standard
Spectral range (50% points)	300 to 2800 nm	285 to 2800 nm	285 to 2800 nm	285 to 2800 nm	200 to 3600 nm
Sensitivity	5 to 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	5 to 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	7 to 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	7 to 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	7 to 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Impedance	20 to 200 $\Omega$	20 to 200 $\Omega$	10 to 100 $\Omega$	10 to 100 $\Omega$	10 to 100 $\Omega$
Expected output range (0 to 1500 $\text{W}/\text{m}^2$ )	0 to 30 mV	0 to 30 mV	0 to 20 mV	0 to 20 mV	0 to 20 mV
Maximum operational irradiance	2000 $\text{W}/\text{m}^2$	2000 $\text{W}/\text{m}^2$	4000 $\text{W}/\text{m}^2$	4000 $\text{W}/\text{m}^2$	4000 $\text{W}/\text{m}^2$
Response time (63%)	< 6 s	< 6 s	< 1.7 s	< 1.7 s	< 1.7 s
Response time (95%)	< 18 s	< 18 s	< 5 s	< 5 s	< 5 s
Zero offsets					
(a) thermal radiation (at 200 $\text{W}/\text{m}^2$ )	< 15 $\text{W}/\text{m}^2$	< 12 $\text{W}/\text{m}^2$	< 7 $\text{W}/\text{m}^2$	< 7 $\text{W}/\text{m}^2$	< 3 $\text{W}/\text{m}^2$
(b) temperature change (5 $\text{K}/\text{h}$ )	< 5 $\text{W}/\text{m}^2$	< 4 $\text{W}/\text{m}^2$	< 2 $\text{W}/\text{m}^2$	< 2 $\text{W}/\text{m}^2$	< 1 $\text{W}/\text{m}^2$
Non-stability (change/year)	< 1%	< 1%	< 0.5%	< 0.5%	< 0.5%
Non-linearity (100 to 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	< 1.5%	< 1%	< 0.2%	< 0.2%	< 0.2%
Directional response (up to 80° with 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ beam)	< 20 $\text{W}/\text{m}^2$	< 20 $\text{W}/\text{m}^2$	< 10 $\text{W}/\text{m}^2$	< 10 $\text{W}/\text{m}^2$	< 5 $\text{W}/\text{m}^2$
Spectral selectivity (350 to 1500 nm)	< 3%	< 3%	< 3%	< 3%	< 3%
Temperature response	< 5% (-10°C to +40°C)	< 4% (-10°C to +40°C)	< 1% (-10°C to +40°C)	< 1% (-10°C to +50°C)	< 0.5% (-20°C to +50°C)
Tilt response (0° to 90° at 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	< 1%	< 1%	< 0.2%	< 0.2%	< 0.2%
Field of view	180°	180°	180°	180°	180°
Accuracy of bubble level	< 0.2°	< 0.1°	< 0.1°	< 0.1°	< 0.1°
Temperature sensor output				10 K Thermistor (optional Pt-100)	10 K Thermistor (optional Pt-100)
Detector type	Thermopile	Thermopile	Thermopile	Thermopile	Thermopile
Operational temperature range	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C
Storage temperature range	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C
Humidity range	0 to 100% non-condensing	0 to 100% non-condensing	0 to 100% non-condensing	0 to 100% non-condensing	0 to 100% non-condensing
Ingress Protection (IP) rating	67	67	67	67	67
Recommended applications	Economical solution for routine measurements in weather stations, field testing	Good quality measurements for hydrology networks, greenhouse climate control	Meteorological networks, PV panel and thermal collector testing, materials testing	Meteorological networks, reference measurements in extreme climates, polar or arid	Scientific research requiring the highest level of measurement accuracy and reliability

Note: The performance specifications quoted are worst-case and/or maximum values

Standard 10k Thermistor or optional Pt-100 temperature sensor with CMP 21 and CMP 22

Individual directional response and temperature dependence test data with CMP 21 and CMP 22



## 7.5.2. Plástico agrícola Polietileno blanco laminado lechoso anti UV

**Producto : POLIET. BLA. LAM. UV 1 TEMP. LECH**

Descripción : Polietileno Blanco Lechoso
Tipo : Polietileno Blanco con Aditivo UV
Color : Blanco Lechoso
Ancho : Desde 60 a 170 cm
Tolerancia Espesor Promedio : $\pm 5\%$
Durabilidad Mínima Radiación UV : 1 Temporada Agrícola
Uso : Hortalizas e Invernaderos





Las Esteras Sur 2831 Quilicura  
Santiago de Chile

Fonos (56 2) 26664000  
26664062

[www.filmamerica.cl](http://www.filmamerica.cl)  
Email [ventas@filmamerica.cl](mailto:ventas@filmamerica.cl)



**FilmAmérica**<sup>®</sup>  
Ingeniería en Plásticos

**POLIET. BLA. LAM. UV 1 TEMP. LECH**

**Ficha Técnica**

Propiedades Película	Uns	35 mic
Resistencia Tracción DM	Kgf	> 1.9
Resistencia Tracción DT	Kgf	> 1.7
Estrés Cima DM	Mpa	> 17
Estrés Cima DT	Mpa	> 16
Máxima Elongación DM	%	> 450
Máxima Elongación DT	%	> 530
Tracción Punzonado	Kgf	> 4.0
Elongación Punzonado	cm	> 6.0
Resistencia Fluencia DM	Kgf	> 1.0
Resistencia Fluencia DT	Kgf	> 0.8

Las cifras antes señaladas corresponden a promedios estadísticos y no son valores mínimos garantizados.  
Ensayos realizados en base a normas ASTM D882, NCh 1151-1148-1149, UNE 53-328-85 53-165-86 53-104-86, CEN TC 249.





**FilmAmérica**<sup>®</sup>  
Ingeniería en Plásticos

## **7.6. Pérdidas montaje simulado**

Module mismatch: pérdidas asociadas a la interconexión de celdas solares que no tienen propiedades idénticas o que experimentan distintas condiciones.

Wiring: pérdidas por resistencia propia de los cables. 2% para lado DC y 1% AC.

Pérdidas por diodos bypass y conexiones: diodos que permiten desconectar a módulos que se encuentran sombreados o produciendo poco para que no afecten todo el string.

Nameplate: diferencias entre datasheet y condiciones reales a STC. Actualmente 0%.

Dc power optimizer loss: Da cuenta de las pérdidas de energía de cualquier equipo de acondicionamiento de energía instalado con la matriz. SAM no modela explícitamente las pérdidas de conversión DC / DC, pero puede contabilizarlas aquí

