

# **SISTEMA PARA LA DETECCIÓN DE ESTRÉS HÍDRICO EN EL ARÁNDANO BILOXI MEDIANTE TERMOGRAFÍA DE BAJO COSTO**

## **AUTOR(ES)**

Juan Esteban Fuentes Rojas

Gabriel Esteban Martinez Roldan

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA**

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación

Facatativá, Noviembre 2025

# **SISTEMA PARA LA DETECCIÓN DE ESTRÉS HÍDRICO EN EL ARÁNDANO BILOXI MEDIANTE TERMOGRAFÍA DE BAJO COSTO**

## **AUTOR(ES)**

Directora: Ing. Gina Maribel Valenzuela Sabogal

Juan Esteban Fuentes Rojas

Gabriel Esteban Martinez Roldan

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS Y TECNOLOGÍA DE FACATATIVÁ  
(GISTFA)**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA**

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería de Sistemas

Facatativá, Noviembre 2025

# **Dedicatoria**

Texto de la dedicatoria...

# **Agradecimientos**

Texto de los agradecimientos...

# Resumen

La gestión eficiente del agua es un desafío creciente en la agricultura, especialmente para cultivos sensibles como el arándano Biloxi. Las tecnologías de monitoreo avanzado, como la termografía infrarroja (IRT), pueden ayudar a optimizar el riego al detectar el estrés hídrico de forma temprana midiendo la temperatura de las plantas. Sin embargo, el alto costo de los equipos comerciales limita su uso, particularmente para pequeños y medianos productores.

Este trabajo presenta el desarrollo completo de un sistema alternativo de bajo costo para monitorear el estrés hídrico en arándanos. Se construyó un prototipo utilizando componentes electrónicos asequibles, incluyendo un sensor térmico de matriz, sensores ambientales y un microcontrolador, junto con una aplicación web para visualizar los datos.

Para asegurar la confianza en el sistema, primero se evaluó la precisión y fiabilidad de sus componentes de hardware en condiciones controladas. Se confirmó que, con piezas nuevas y bien seleccionadas, el prototipo ofrece mediciones consistentes. No obstante, se observó que el uso prolongado puede afectar la precisión de algunos sensores de bajo costo, destacando la importancia de revisiones periódicas.

Posteriormente, se probó el sistema monitorizando una planta de arándano durante 55 días, simulando un periodo de sequía seguido de riego normal. El sistema demostró ser capaz de detectar los cambios en la temperatura de la planta asociados a la falta de agua y su posterior recuperación. Los indicadores térmicos calculados reflejaron claramente el aumento del estrés durante la sequía y la mejora tras volver a regar.

Por lo tanto, este proyecto demuestra que es viable construir herramientas de monitoreo termográfico funcionales y asequibles. Se presenta una solución tecnológica completa y validada que abre la puerta a una agricultura de precisión más accesible, ayudando a los agricultores a tomar mejores decisiones sobre el riego y a fomentar un uso más sostenible del agua.

**Palabras clave:** Termografía infrarroja, Estrés hídrico, Arándano Biloxi, Agricultura de precisión, Tecnología de bajo costo, Monitoreo de cultivos, Internet de las Cosas (IoT), Gestión del agua.

# Abstract

Efficient water management is a growing challenge in agriculture, especially for sensitive crops like Biloxi blueberries. Advanced monitoring technologies, such as infrared thermography (IRT), can help optimize irrigation by detecting water stress early through plant temperature measurements. However, the high cost of commercial equipment limits its use, particularly for small and medium-sized producers.

This work presents the complete development of an alternative low-cost system for monitoring water stress in blueberries. A prototype was built using affordable electronic components, including a thermal array sensor, environmental sensors, and a microcontroller, along with a web application to visualize the data.

To ensure confidence in the system, the accuracy and reliability of its hardware components were first evaluated under controlled conditions. It was confirmed that, with new and well-selected parts, the prototype provides consistent measurements. However, it was observed that prolonged use can affect the accuracy of some low-cost sensors, highlighting the importance of periodic checks.

Subsequently, the system was tested by monitoring a blueberry plant for 55 days, simulating a period of drought followed by normal irrigation. The system proved capable of detecting changes in plant temperature associated with water deficit and subsequent recovery. Calculated thermal indicators clearly reflected increased stress during drought and improvement after re-watering.

In conclusion, this project demonstrates that it is feasible to build functional and affordable thermographic monitoring tools. A complete and validated technological solution is presented, opening the door to more accessible precision agriculture, helping farmers make better irrigation decisions and promoting more sustainable water use.

**Keywords:** Infrared thermography, Water stress, Biloxi blueberry, Precision agriculture, Low-cost technology, Crop monitoring, Internet of Things (IoT), Water management.

# Índice general

<b>Dedicatoria</b>	<b>II</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>XII</b>
<b>Introducción</b>	<b>XIII</b>
<b>1 INFORME DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Estado del Arte . . . . .	1
1.2 Línea de Investigación . . . . .	5
1.3 Planteamiento del Problema y Pregunta de Investigación . . . . .	6
1.4 Objetivo General y Objetivos Específicos . . . . .	7
1.4.1 Objetivo General . . . . .	7
1.4.2 Objetivos Específicos . . . . .	7
1.5 Alcance e Impacto del Proyecto . . . . .	8
1.6 Metodología . . . . .	9
1.7 Marcos de Referencia . . . . .	10
1.7.1 Marco Teórico . . . . .	10
1.7.2 Marco Legal . . . . .	13
<b>2 DOCUMENTACIÓN SOFTWARE</b>	<b>15</b>
2.1 Plan de Proyecto . . . . .	15
2.2 Arquitectura del Software . . . . .	17
2.2.1 Patrón Arquitectónico y Diseño Lógico . . . . .	18
2.2.2 Arquitectura Física e Infraestructura . . . . .	20
2.2.3 Stack Tecnológico . . . . .	22
2.3 Determinación de Requerimientos . . . . .	25

2.4	Especificación del Diseño . . . . .	31
2.4.1	Modelo de Entidad-Relación (MER) . . . . .	31
2.4.2	Diagramas de Casos de Uso . . . . .	35
2.4.3	Diagramas de Secuencia . . . . .	50
2.4.4	Diagramas de Actividades . . . . .	82
2.4.5	Diagrama de Clases . . . . .	113
2.4.6	Diagrama de Despliegue . . . . .	127
2.5	Diseño de los Casos de Prueba . . . . .	129
2.6	Estimación de Recursos . . . . .	129
2.6.1	Metodología de Puntos de Casos de Uso (UCP) . . . . .	130
2.6.2	Aplicación del Método UCP al Proyecto . . . . .	131
2.6.3	Estimación de Esfuerzo . . . . .	134
2.6.4	Estimación de Costos . . . . .	135
2.7	Resultados de la Implementación del Software . . . . .	136
<b>3</b>	<b>DOCUMENTACIÓN HARDWARE</b>	<b>139</b>
3.1	Introducción . . . . .	139
3.2	Objetivos . . . . .	139
3.3	Descripción de Componentes . . . . .	139
3.3.1	Microcontrolador ESP32-S3-WROOM-1 N16R8 . . . . .	139
3.3.2	Cámara termográfica MLX90640 . . . . .	140
3.3.3	Sensor de luz BH1750 . . . . .	140
3.3.4	Sensor de humedad y temperatura DHT22 . . . . .	140
3.3.5	Cámara RGB OV2640 . . . . .	140
3.3.6	Regulador de voltaje LM2596 . . . . .	140
3.4	Metodología de Caracterización . . . . .	140
3.4.1	Evaluación y verificación de componentes . . . . .	140
3.4.2	Configuración e Integración del Firmware . . . . .	141
3.4.3	Validación y Análisis de Resultados . . . . .	141
3.5	Implementación del Sistema Integrado . . . . .	142
3.6	Resultados . . . . .	142
<b>4</b>	<b>ESTUDIO EXPERIMENTAL</b>	<b>143</b>
4.1	Introducción . . . . .	144
4.2	Materiales y Métodos . . . . .	145

4.2.1	Planteamiento Metodológico . . . . .	145
4.3	Diseño Experimental . . . . .	146
4.4	Recolección y Análisis de Datos . . . . .	147
4.5	Resultados . . . . .	149
<b>5</b>	<b>Resultados y Conclusiones Finales</b>	<b>157</b>
5.1	Respuesta a la Pregunta de Investigación . . . . .	157
5.2	Discusión General . . . . .	158
5.2.1	Consecución de los Objetivos Planteados . . . . .	159
5.2.2	Fortalezas y Limitaciones del Sistema . . . . .	161
5.2.3	Impacto Potencial . . . . .	162
5.3	Recomendaciones y Trabajo Futuro . . . . .	163
5.4	Conclusiones Finales . . . . .	164
<b>Bibliografía</b>		<b>166</b>
Referencias . . . . .		166

# **Lista de Tablas**

1	Comparativo entre métodos de medición de temperatura. . . . .	2
2	<i>Requerimiento Funcional RF01: Registro</i> . . . . .	25
3	<i>Requerimiento Funcional RF02: Inicio de sesión</i> . . . . .	25
4	<i>Requerimiento Funcional RF03: CRUD cámara</i> . . . . .	26
5	<i>Requerimiento Funcional RF04: CRUD persona</i> . . . . .	26
6	<i>Requerimiento Funcional RF05: Módulo de mediciones</i> . . . . .	27
7	<i>Requerimiento Funcional RF06: Módulo de procesamiento</i> . . . . .	27
8	<i>Requerimiento Funcional RF07: Reportes</i> . . . . .	28
9	<i>Requerimiento Funcional RF08: Notificaciones</i> . . . . .	28
10	<i>Requerimiento Funcional RF09: Gestionar Observaciones</i> . . . . .	29
11	<i>Requerimiento No Funcional RNF01: Seguridad</i> . . . . .	29
12	<i>Requerimiento No Funcional RNF02: Copia de seguridad</i> . . . . .	30
13	Cálculo del Peso No Ajustado de los Actores (UAW). . . . .	131
14	Cálculo del Peso No Ajustado de los Casos de Uso (UUCW). . . . .	132
15	Cálculo del Factor de Complejidad Técnica (TCF). . . . .	133
16	Cálculo del Factor de Complejidad Ambiental (ECF). . . . .	134
17	Resumen de Costos Estimados del Proyecto (COP) - Ajustado. . . . .	136
18	Comparación del estrés térmico ( $\Delta T$ ) bajo demandas atmosféricas equivalentes. . . . .	155

# **Lista de Figuras**

1	Imagen termográfica de una planta con cámara MLX90640. . . . .	3
2	Diagrama de Gantt del proyecto. . . . .	16
3	Diagrama de Despliegue Físico del Sistema Arandano IRT. . . . .	21
4	Diagrama Entidad-Relación del Sistema. . . . .	31
5	Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Usuarios (RF1, RF2). . . . .	36
6	Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Cámaras (RF3). . . . .	38
7	Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Perfiles (RF4). . . . .	40
8	Diagrama de Casos de Uso para el Módulo de Mediciones (RF5). . . . .	42
9	Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Plantas (RF6). . . . .	44
10	Diagrama de Casos de Uso para la Generación de Reportes (RF7). . . . .	46
11	Diagrama de Casos de Uso para las Notificaciones (RF8). . . . .	48
12	Diagrama de Casos de Uso para el Módulo de Observaciones (RF9). . . . .	49
13	Diagrama de secuencia base: Envío de formulario. . . . .	53
14	Diagrama de Secuencia para el Registro (RF1.0). . . . .	55
15	Diagrama de Secuencia para Solicitar Código (RF1.1). . . . .	56
16	Diagrama de Secuencia para Iniciar Sesión (RF2.0). . . . .	57
17	Diagrama de Secuencia para Cerrar Sesión (RF2.1). . . . .	58
18	Diagrama de Secuencia para Recuperar Contraseña (RF2.2). . . . .	59
19	Diagrama de Secuencia para Crear Cámara (RF3.1). . . . .	60
20	Diagrama de Secuencia para Activar Cámara (RF3.1.1). . . . .	61
21	Diagrama de Secuencia para Consultar Cámara (RF3.2). . . . .	63
22	Diagrama de Secuencia para Editar Cámara (RF3.3). . . . .	64
23	Diagrama de Secuencia para Eliminar Cámara (RF3.4). . . . .	65
24	Diagrama de Secuencia para Consultar Perfil (RF4.1). . . . .	66
25	Diagrama de Secuencia para Editar Perfil (RF4.2). . . . .	67

26	Diagrama de Secuencia para Eliminar Perfil (RF4.3). . . . .	68
27	Diagrama de Secuencia para Cambiar Contraseña (RF4.4). . . . .	69
28	Diagrama de Secuencia para Agregar Integrante de Cultivo (RF4.5). . . . .	70
29	Diagrama de Secuencia para Eliminar Integrante de Cultivo (RF4.6). . . . .	71
30	Diagrama de Secuencia para el Módulo de Mediciones (RF5.0). . . . .	72
31	Diagrama de Secuencia para Crear Planta (RF6.1). . . . .	73
32	Diagrama de Secuencia para Consultar Planta (RF6.2). . . . .	74
33	Diagrama de Secuencia para Editar Planta (RF6.3). . . . .	75
34	Diagrama de Secuencia para Eliminar Planta (RF6.4). . . . .	76
35	Diagrama de Secuencia para Generar Reporte (RF7.0). . . . .	77
36	Diagrama de Secuencia para Descargar Reporte (RF7.1). . . . .	77
37	Diagrama de Secuencia para Adjuntar Reporte (RF7.2). . . . .	78
38	Diagrama de Secuencia para Notificar Planta (RF8.1). . . . .	79
39	Diagrama de Secuencia para Notificar Seguridad (RF8.2). . . . .	80
40	Diagrama de Secuencia para Crear Observación (RF9.1). . . . .	81
41	Diagrama de Secuencia para Consultar Observación (RF9.1). . . . .	81
42	Diagrama de Actividad para el Registro (RF1.0). . . . .	84
43	Diagrama de Actividad para Solicitar Código (RF1.1). . . . .	85
44	Diagrama de Actividad para Iniciar Sesión (RF2.0). . . . .	86
45	Diagrama de Actividad para Cerrar Sesión (RF2.1). . . . .	87
46	Diagrama de Actividad para Recuperar Contraseña (RF2.2). . . . .	88
47	Diagrama de Actividad para Crear Cámara (RF3.1). . . . .	89
48	Diagrama de Actividad para Activar Cámara (RF3.1.1). . . . .	90
49	Diagrama de Actividad para Consultar Cámara (RF3.2). . . . .	92
50	Diagrama de Actividad para Editar Cámara (RF3.3). . . . .	93
51	Diagrama de Actividad para Eliminar Cámara (RF3.4). . . . .	94
52	Diagrama de Actividad para Consultar Perfil (RF4.1). . . . .	95
53	Diagrama de Actividad para Editar Perfil (RF4.2). . . . .	96
54	Diagrama de Actividad para Eliminar Perfil (RF4.3). . . . .	97
55	Diagrama de Actividad para Cambiar Contraseña (RF4.4). . . . .	98
56	Diagrama de Actividad para Agregar Integrante de Cultivo (RF4.5). . . . .	99
57	Diagrama de Actividad para Eliminar Integrante de Cultivo (RF4.6). . . . .	100
58	Diagrama de Actividad para el Módulo de Mediciones (RF5.0). . . . .	101

59	Diagrama de Actividad para Crear Planta (RF6.1). . . . .	102
60	Diagrama de Actividad para Consultar Planta (RF6.2). . . . .	103
61	Diagrama de Actividad para Editar Planta (RF6.3). . . . .	104
62	Diagrama de Actividad para Eliminar Planta (RF6.4). . . . .	105
63	Diagrama de Actividad para Generar Reporte (RF7.0). . . . .	106
64	Diagrama de Actividad para Descargar Reporte (RF7.1). . . . .	107
65	Diagrama de Actividad para Adjuntar Reporte (RF7.2). . . . .	108
66	Diagrama de Actividad para Notificar Planta (RF8.1). . . . .	109
67	Diagrama de Actividad para Notificar Seguridad (RF8.2). . . . .	110
68	Diagrama de Actividad para Crear Observación (RF9.1). . . . .	111
69	Diagrama de Actividad para Consultar Observación (RF9.2). . . . .	112
70	Diagrama de Clases: Entidades Principales y Datos de Monitoreo. . . . .	113
71	Diagrama de Clases: Gestión de Usuarios y Roles. . . . .	115
72	Diagrama de Clases: Ciclo de Vida y Seguridad del Dispositivo. . . . .	117
73	Diagrama de Clases: Configuraciones de Cultivo. . . . .	118
74	Diagrama de Clases: Gestión de Usuarios y Autenticación (Capa de Aplicación). . . . .	119
75	Diagrama de Clases: Gestión de Entidades (CRUD) (Capa de Aplicación). . . . .	121
76	Diagrama de Clases: Interacción con Dispositivos y Envío de Datos (Capa de Aplicación). . . . .	122
77	Diagrama de Clases: Arquitectura de Peticiones y Seguridad. . . . .	124
78	Diagrama de Clases: Patrón de Controladores y Vistas (MVC / API). . . . .	126
79	Diagrama de Despliegue del Sistema. . . . .	128
80	Distribución horaria del estrés térmico ( $\Delta T$ ). Los boxes muestran la mediana y los cuartiles, los bigotes el rango intercuartílico $\times 1,5$ . . . . .	150
81	Mapa horario del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI) durante los 55 días del experimento. La línea punteada marca la reanudación del riego. . . . .	152
82	Distribución del estrés térmico ( $\Delta T$ ) segmentado por condición climática externa. . . . .	154

# Introducción

La agricultura contemporánea enfrenta el desafío dual de incrementar la producción de alimentos para una población creciente y, simultáneamente, adaptarse a los efectos del cambio climático, que intensifican la presión sobre recursos vitales como el agua (Laveglia, Altieri, Genovese, Matera, y Di Renzo, 2024). La gestión hídrica eficiente se ha convertido, por tanto, en una prioridad global, impulsando la adopción de prácticas agrícolas más sostenibles y tecnificadas. En este contexto, la agricultura de precisión emerge como una estrategia fundamental, empleando tecnologías para medir y responder a la variabilidad espacial y temporal de los cultivos, optimizando así el uso de insumos y mejorando la toma de decisiones agronómicas (Dong, Sloan, y Chappuis, 2024; Vargas Q. y Best S., 2021).

Entre los cultivos de alto valor que demandan una gestión hídrica cuidadosa se encuentra el arándano (*Vaccinium corymbosum* L.), cuya popularidad ha impulsado su expansión en diversas regiones, incluyendo el altiplano cundiboyacense colombiano (Aimeth, 2018). La variedad Biloxi, adaptada a climas con bajos requerimientos de frío, es particularmente relevante en esta zona (Quintana Reina, 2020; Balbontín y Reyes, 2023). Sin embargo, el arándano posee un sistema radicular superficial y poco eficiente, lo que lo hace extremadamente vulnerable al estrés hídrico, tanto por déficit como por exceso, comprometiendo significativamente el crecimiento de la planta, el calibre de los frutos y el rendimiento final de la cosecha (Morales, 2017; INIA, 2017; Almutairi, Bryla, y Strik, 2021; Salgado Vargas, Sánchez-García, Volke-Haller, y Colinas León, 2018). La detección temprana y precisa del estrés hídrico es, por lo tanto, crucial para optimizar el riego y asegurar la sostenibilidad económica del cultivo (Rinza, Ramírez, y Ninanya, 2021).

La termografía infrarroja (IRT) se ha consolidado como una técnica no invasiva y eficaz para este propósito (García Tejero, Perea Martos, Navarro Ramos, Hernández Cotán, y Durán Zuazo, 2015; Erazo-Aux, Loaiza-Correa, y Restrepo-Girón, 2022). Se basa en el principio fisiológico de que las plantas, al experimentar déficit hídrico, cierran sus estomas para conservar agua, reduciendo la transpiración y provocando un aumento medible en la temperatura de la superficie foliar (Jones,

2004; Pineda, Barón, y Pérez-Bueno, 2021; Cho y cols., 2024; Pradawet y cols., 2023). Índices derivados de la IRT, como el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI), permiten cuantificar este nivel de estrés (Idso, Jackson, y Reginato, 1981; Quezada, Bastias, Quintana, Arancibia, y Solís, 2020). No obstante, la aplicación generalizada de la IRT en la agricultura ha estado históricamente limitada por el elevado costo de las cámaras termográficas comerciales, creando una brecha tecnológica significativa, especialmente para pequeños y medianos productores (Dong y cols., 2024; Yun, Lo, Diepenbrock, Bailey, y Earles, 2023).

Avances recientes en la tecnología de sensores, particularmente la aparición de matrices térmicas de bajo costo como el MLX90640 (Melexis, 2021), han abierto nuevas posibilidades para desarrollar herramientas de monitoreo más asequibles (Dong y cols., 2024). Sin embargo, la fiabilidad de estos componentes de bajo costo en aplicaciones agrícolas exigentes requiere una validación metrológica rigurosa antes de su implementación práctica (Acorsi, Gimenez, y Martello, 2020; Jiao, Wang, Shuang, Dong, y Jiao, 2022; Yun y cols., 2023). Factores como el desgaste por uso y la sensibilidad a condiciones ambientales pueden impactar su precisión y estabilidad a largo plazo.

Este trabajo aborda precisamente esta problemática, presentando el diseño, desarrollo, validación y prueba de concepto de un **sistema integral de bajo costo para la detección del estrés hídrico en arándano Biloxi mediante termografía infrarroja**. El sistema combina hardware asequible (microcontrolador ESP32-S3, sensor térmico MLX90640, sensores ambientales MEMS) con software embebido y una aplicación web para la adquisición, procesamiento (cálculo de  $\Delta T$  y CWSI) y visualización de datos.

El proyecto se estructura en cinco capítulos principales. El **Capítulo I** establece el marco de la investigación, presentando el estado del arte, el planteamiento del problema, los objetivos, el alcance y la metodología general. El **Capítulo II** detalla exhaustivamente la documentación del software desarrollado, incluyendo la arquitectura (MVC, Onion), el stack tecnológico, la especificación de requerimientos, el diseño detallado mediante diagramas UML (Casos de Uso, Secuencia, Actividad, Clases, Despliegue) y una estimación de recursos basada en Puntos de Casos de Uso. El **Capítulo III** se enfoca en la documentación del hardware, describiendo los componentes seleccionados y la metodología empleada para su caracterización y validación metrológica, abordando aspectos clave como la precisión y el impacto del desgaste. El **Capítulo IV** presenta el estudio experimental realizado como prueba de concepto (PoC), detallando el diseño metodológico (caso único n=1), el procedimiento de estrés hídrico inducido y recuperación, la recolección de datos y los resultados obtenidos en términos de respuesta térmica ( $\Delta T$ , CWSI) de la planta monitoreada. Finalmente, el **Capítulo V** consolida los resultados y conclusiones finales, discutiendo la consecución de

los objetivos, las fortalezas y limitaciones del sistema desarrollado, su impacto potencial y las recomendaciones para trabajos futuros.

Mediante la integración de la validación instrumental del hardware y la demostración funcional en un escenario experimental relevante, este trabajo busca no solo responder a la pregunta de investigación sobre la viabilidad de la termografía de bajo costo, sino también aportar una base técnica sólida para el desarrollo futuro de herramientas accesibles que impulsen una agricultura más precisa, eficiente y sostenible.

# I. INFORME DE INVESTIGACIÓN

## 1.1. Estado del Arte

La termografía infrarroja (IRT) es una técnica basada en el estudio de la radiación emitida por los cuerpos, lo que permite generar una imagen representativa de su temperatura superficial. En España, investigadores del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA) señalan que esta técnica es robusta, rápida y versátil para el monitoreo agrícola (García Tejero y cols., 2015). Su aplicabilidad se fundamenta en que la temperatura foliar es un valioso indicador del estado fisiológico de la planta, ya que responde a diversos factores de estrés (Pineda y cols., 2021).

Una de sus aplicaciones se da en el ámbito agrícola, donde se destaca frente a otros métodos de medición de temperatura. Esto se evidencia en el estudio “Open-source time-lapse thermal imaging camera for canopy temperature monitoring”, realizado por investigadores de la Universidad Estatal de Michigan (Dong y cols., 2024). En este trabajo, los autores analizan diversos métodos para monitorear la temperatura de la superficie foliar, cuyos resultados se sintetizan en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Comparativo entre métodos de medición de temperatura.*

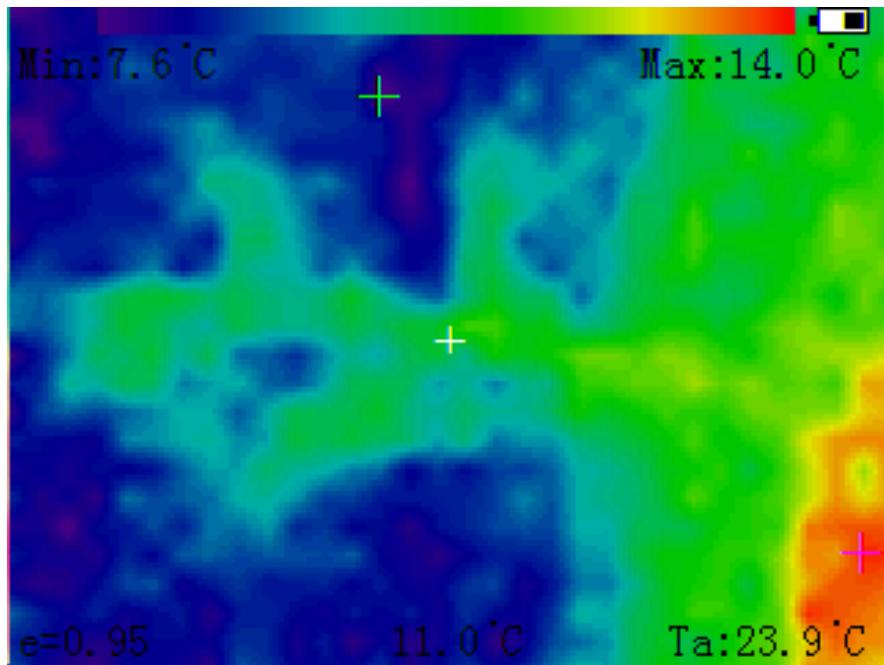
Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Termómetro Infrarrojo	Utiliza un haz infrarrojo para medir la radiación/energía reflejada de una superficie objetivo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Método sin contacto</li> <li>■ Amplia disponibilidad en el mercado</li> <li>■ Preciso con certificado de calibración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Problemas con la emisividad</li> <li>■ Errores aumentan con la distancia</li> <li>■ Limitado a un solo punto en la superficie de la hoja</li> </ul>
Sonda de Temperatura Táctil	El sensor de temperatura se sujet a la superficie de la hoja y mide la resistencia térmica usando una fuente de corriente constante y tres cables.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bajo costo</li> <li>■ Alta precisión para mediciones puntuales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Puede alterar el microambiente natural de la planta</li> <li>■ Problemas con hojas pequeñas, jóvenes o muy delgadas</li> <li>■ Fluctuaciones de temperatura en el cable del sensor</li> </ul>
Cámara de Imagen Térmica	Utilizada ampliamente en agricultura para monitorear la salud de las plantas, programación de riego, detección de enfermedades, estimación de rendimiento, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Observación continua de imágenes térmicas</li> <li>■ Información útil sobre el estrés hídrico y la salud de las plantas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Cámaras térmicas continuas limitadas y costosas</li> <li>■ Método más complejo y caro en comparación con otros métodos</li> </ul>

De acuerdo con la tabla anterior, se destacan las ventajas de la cámara de imagen térmica, que permite monitorear la temperatura de las plantas de manera no invasiva. Por lo anterior se propone utilizar esta tecnología para el proyecto. No obstante, debido a los altos costos de las cámaras térmicas, se busca emplear hardware de bajo costo, con la expectativa de obtener resultados que permitan cumplir los objetivos de esta investigación.

En la agricultura, la IRT se ha consolidado como una herramienta potente para la gestión hídrica. La relación es directa: el estrés por falta de agua provoca un cierre estomático que reduce la transpiración y, en consecuencia, eleva la temperatura de la planta (García Tejero y cols., 2015).

## **Figura 1**

*Imagen termográfica de una planta con cámara MLX90640.*



A pesar de su potencial, uno de los principales desafíos para su adopción ha sido el alto costo de los equipos comerciales. Sin embargo, investigaciones recientes en Estados Unidos, lideradas por la Universidad Estatal de Michigan, han demostrado la viabilidad de utilizar hardware de bajo costo, como cámaras térmicas compactas acopladas a microcomputadoras, para monitorear la temperatura del dosel con precisión suficiente para aplicaciones agrícolas, incluyendo el arándano (Dong y cols., 2024).

En el contexto latinoamericano, también se ha validado su eficacia. Un estudio conjunto entre el Instituto Federal de Espírito Santo en Brasil y la Universidad de Georgia en Estados Unidos, demostró que la termografía diferencia eficazmente entre plantas de cítricos con distintos niveles de riego en invernadero (Vieira y Ferrarezi, 2021). Asimismo, en Chile, investigadores de la Universidad de Concepción validaron el uso de índices térmicos como el CWSI (Índice de Estrés Hídrico del Cultivo) como un indicador fiable del estado hídrico en frutales (Quezada y cols., 2020).

Esta tecnología es particularmente relevante para el arándano, un cultivo cuyo sistema radicular superficial lo hace muy susceptible a las fluctuaciones de agua, según lo documentado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile (Morales, 2017). Una gestión hídrica inadecuada en este cultivo impacta negativamente el rendimiento y la calidad de la fruta, haciendo fundamental contar con métodos de detección de estrés.

Este tema ha cobrado relevancia en Colombia, como lo demuestran los avances a nivel de software para el análisis de imágenes infrarrojas realizados por la Universidad del Valle, en su estudio sobre el uso de la termografía en América Latina (Aux, Correa, y Girón, 2022). Paralelamente, la industria del arándano en el país ha crecido notablemente, con un aumento promedio anual del 9.1 % desde el año 2000 (Aimeth, 2018). Este crecimiento se ha acelerado desde 2019, siendo Boyacá uno de los departamentos líderes en la producción (Blanco, Barreto, y Camargo, 2023). La importancia económica del cultivo es subrayada en un estudio de la Universidad de Cundinamarca, donde se destaca su gran potencial de exportación (Augusto y Emerson, 2023). En este contexto, la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia menciona que la variedad Biloxi es la principal sembrada en el Altiplano Cundiboyacense debido a su resistencia, buen calibre y producción (Quintana Reina, 2020).

En resumen, los estudios internacionales y regionales demuestran que la termografía es una tecnología con gran potencial para monitorear el estado hídrico de las plantas. Su aplicación en el arándano Biloxi ofrece una herramienta útil para detectar el estrés hídrico y optimizar el riego. Sin embargo, la aplicación de esta tecnología sigue estando limitada debido a los altos costos del hardware especializado. La combinación del crecimiento de la industria del arándano en Colombia y los avances en hardware de bajo costo ofrece una oportunidad clara para desarrollar soluciones tecnológicas que mejoren la producción y protección del cultivo en el país.

## 1.2. Línea de Investigación

La adscripción de este proyecto a la línea de investigación **Aprendizaje, conocimiento, tecnologías, comunicación y digitalización** se justifica plenamente por la naturaleza y los objetivos de la solución propuesta. El sistema de detección de estrés hídrico no es un fin en sí mismo, sino una herramienta integral que aborda sistemáticamente cada uno de los pilares de esta línea:

**Tecnologías y Digitalización:** El núcleo del proyecto es la *aplicación de tecnología* (hardware de bajo costo como sensores IRT y microcontroladores) y el desarrollo de software para la *digitalización* de un proceso agrícola. Se captura un fenómeno físico y análogo (la temperatura foliar de la planta) y se transforma en datos digitales estructurados y analizables, lo cual es la esencia de la agricultura de precisión y la Industria 4.0.

**Conocimiento:** El sistema no se limita a recolectar datos; su función principal es procesar esa información digital para generar *conocimiento* nuevo y accionable. Transforma lecturas térmicas brutas en un indicador claro y comprensible (un reporte de estado hídrico) que representa el estado fisiológico de la planta. Este es un conocimiento al que el agricultor no podría acceder por simple observación.

**Comunicación:** El resultado de este procesamiento se convierte en un acto de *comunicación* fundamental. El sistema actúa como un puente que “traduce” el estado fisiológico del cultivo y *comunica* eficazmente un reporte al agricultor. Se supera así la barrera de la detección visual tardía, estableciendo un nuevo canal de comunicación directo entre la planta y el productor.

**Aprendizaje:** Finalmente, la iniciativa cierra el ciclo del *aprendizaje*. Al recibir esta información (comunicación) derivada del conocimiento (procesamiento), el agricultor *aprende* en tiempo real sobre las necesidades hídricas de su cultivo. Este aprendizaje validado por datos fomenta

una cultura de gestión eficiente, optimiza el uso de recursos y permite tomar decisiones informadas para mejorar la productividad.

En conjunto, el proyecto es un ejemplo claro de cómo la tecnología y la digitalización facilitan la generación de conocimiento, mejoran la comunicación y promueven un aprendizaje práctico y continuo en el sector agrícola.

### **1.3. Planteamiento del Problema y Pregunta de Investigación**

La producción de arándanos en Colombia está en una fase de expansión significativa, impulsada por una alta demanda en los mercados internacionales. La variedad Biloxi se ha destacado como una de las más cultivadas en el altiplano cundiboyacense debido a su adaptabilidad y calidad de fruto (Quintana Reina, 2020). La relevancia económica de este cultivo se refleja en el notable crecimiento de las exportaciones. En 2024, estas sumaron US\$3,29 millones, lo que representó una cifra histórica que se elevó 85 % frente a 2023 y puso fin a tres años consecutivos de caídas (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2025).

A pesar de su potencial, el arándano es un cultivo particularmente sensible a las condiciones hídricas. Su sistema radicular se caracteriza por ser fibroso, superficial y carente de pelos absorbentes, lo que limita su capacidad para explorar el perfil del suelo en busca de agua (Morales, 2017). Esta característica lo hace extremadamente vulnerable al estrés hídrico, tanto por déficit como por exceso, lo que puede provocar una reducción drástica en el crecimiento de la planta, el calibre de los frutos y, en última instancia, el rendimiento total del cultivo. Sin un manejo preciso del riego, los productores enfrentan un riesgo constante de pérdidas económicas significativas.

Fisiológicamente, las plantas responden al déficit de agua cerrando sus estomas para reducir la pérdida de agua por transpiración. La transpiración es un mecanismo de enfriamiento natural; por lo tanto, su disminución provoca un aumento medible en la temperatura de la superficie de las hojas

(García Tejero y cols., 2015). Este cambio térmico es un indicador temprano y fiable del estrés hídrico, a menudo detectable antes de que los síntomas visuales, como la marchitez, sean evidentes (Pineda y cols., 2021).

La termografía infrarroja (IRT) es una técnica no invasiva que permite detectar estas variaciones de temperatura y, por consiguiente, monitorear el estado hídrico de los cultivos para optimizar el riego (Dong y cols., 2024; Vieira y Ferrarezi, 2021). Su aplicación en la agricultura de precisión es una herramienta valiosa para una gestión más sostenible y automatizada. Sin embargo, su adopción se ha visto limitada por el alto costo de los equipos termográficos, lo que los hace inaccesibles para muchos agricultores e investigadores (García Tejero y cols., 2015).

Considerando la vulnerabilidad del arándano Biloxi al estrés hídrico y la barrera económica de las tecnologías de monitoreo existentes, surge la necesidad de explorar alternativas más asequibles. Esto conduce a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo se puede desarrollar un sistema que utilice hardware de bajo costo para la detección aproximada del estrés hídrico en plantas de arándano Biloxi mediante termografía?

## **1.4. Objetivo General y Objetivos Específicos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Desarrollar un sistema basado en termografía infrarroja (IRT) y hardware de bajo costo para la detección del estrés hídrico en plantas de arándano Biloxi.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

1. Identificar y documentar los requisitos funcionales y no funcionales del sistema.
2. Modelar la arquitectura del sistema mediante la creación de diagramas UML.

3. Integrar el hardware del módulo termográfico para la recolección de datos.
4. Desarrollar el software que recolecte los datos del módulo termográfico para su posterior procesamiento.
5. Evaluar la generación de un reporte de estado hídrico que diferencie entre plantas de arándano Biloxi con riego óptimo y con déficit, a partir de los datos recopilados por el sistema.

## 1.5. Alcance e Impacto del Proyecto

El presente proyecto busca ser un apoyo a la producción de arándanos a través de la implementación de tecnologías de precisión *asequibles*, como la termografía de bajo costo, para monitorear y gestionar la salud de los cultivos. Esto podría permitir a los agricultores minimizar las pérdidas en las cosechas y, con ello, contribuir a “satisfacer los desafíos de seguridad alimentaria local, regional y global del siglo XXI” (Vargas Q. y Best S., 2021).

La agricultura de precisión, apoyada en tecnologías como la termografía, es fundamental para una producción más sostenible, ya que permite optimizar el uso de recursos críticos como el agua (Pineda y cols., 2021). La capacidad de monitorear el estado hídrico de las plantas en tiempo real posibilita una gestión del riego más eficiente, aplicando agua solo cuando y donde es realmente necesario (García Tejero y cols., 2015). Este enfoque no solo promueve la conservación del recurso hídrico, sino que también contribuye a que los agricultores sean más resilientes y competitivos (Dong y cols., 2024).

Este proyecto está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP), s.f.). Específicamente, responde al **ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura)**, al buscar promover la inversión y la innovación tecnológica en el sector agrícola. También contribuye directamente al **ODS 12**

**(Producción y Consumo Responsables)**, al fomentar una gestión eficiente de los recursos naturales mediante la implementación de prácticas agrícolas sostenibles.

En el plano local, la implementación de este proyecto puede tener un impacto significativo en la seguridad alimentaria y la economía regional. Al reducir las pérdidas económicas en la producción, se fortalecen las cadenas de suministro y se mejora la competitividad de un cultivo de alta importancia para el país (Aimeth, 2018; Augusto y Emerson, 2023). Además, el acceso a tecnologías de precisión de bajo costo ayuda a reducir la brecha digital, democratizando herramientas avanzadas que de otro modo serían inaccesibles para pequeños y medianos productores, lo cual se alinea nuevamente con las metas del ODS 9.

## 1.6. Metodología

Para el desarrollo de la investigación se empleará una metodología mixta, que integra enfoques cuantitativos y cualitativos para obtener una comprensión más profunda del fenómeno estudiado. Este método permite combinar la recolección y análisis de datos numéricos con la interpretación de observaciones cualitativas, fortaleciendo así la validez de los resultados al compensar las limitaciones inherentes de cada enfoque por separado (Hamui-Sutton, 2013).

En el contexto de este proyecto, el componente cuantitativo se centrará en la recolección y análisis de los datos de temperatura superficial de la canopia, obtenidos a través del módulo de cámara térmica. El componente cualitativo consistirá en el registro y la descripción de los indicadores visuales del estado de la planta, como la turgencia de las hojas y el vigor general, bajo diferentes regímenes de riego. La integración de ambos tipos de datos permitirá establecer una relación más robusta entre las lecturas termográficas y el nivel de estrés hídrico aplicado, comprendiendo los factores que puedan influir en la efectividad del sistema.

Para la construcción del sistema, se utilizarán elementos del marco de trabajo ágil Scrum. Este

enfoque se caracteriza por su flexibilidad, adaptabilidad y enfoque en la entrega de valor de manera incremental a lo largo del proyecto (SCRUMstudy™, 2022). Se organizará el trabajo en ciclos cortos o Sprints, gestionando las tareas a través de un Product Backlog para asegurar un desarrollo organizado y eficiente del prototipo.

## 1.7. Marcos de Referencia

### 1.7.1. Marco Teórico

Este marco teórico sienta las bases conceptuales y científicas sobre las que se construye el presente proyecto. Se abordan tres pilares fundamentales: las características del cultivo de arándano variedad Biloxi y su sensibilidad hídrica, los mecanismos fisiológicos del estrés hídrico en las plantas y su detección, y los principios de la termografía infrarroja como herramienta de monitoreo en la agricultura de precisión, con énfasis en soluciones de bajo costo.

#### **El Cultivo de Arándano (*Vaccinium corymbosum L.*)**

El arándano (*Vaccinium corymbosum L.*) es un frutal cuya popularidad y demanda han crecido exponencialmente a nivel mundial, impulsando su expansión en regiones con condiciones agroecológicas adecuadas, como el altiplano cundiboyacense en Colombia (Aimeth, 2018; Augusto y Emerson, 2023). Dentro de las diversas variedades, la Biloxi se ha destacado por su adaptabilidad a climas con bajo requerimiento de frío invernal y por la calidad de su fruto, convirtiéndose en una opción preferente para los productores de la región (Quintana Reina, 2020).

Una característica agronómica crucial del arándano es su sistema radicular. Este es típicamente superficial, fibroso y carente de pelos absorbentes, lo que implica una capacidad limitada para explorar el perfil del suelo en busca de agua y nutrientes (Morales, 2017). Esta particularidad

morfológica hace que el cultivo sea especialmente sensible a las fluctuaciones en la disponibilidad hídrica del suelo. Tanto el déficit como el exceso de agua pueden impactar negativamente el desarrollo vegetativo, el calibre de los frutos y, en consecuencia, el rendimiento general de la cosecha (Morales, 2017; Salgado Vargas y cols., 2018). Por ello, una gestión precisa y oportuna del riego es indispensable para asegurar la viabilidad económica y la sostenibilidad de la producción de arándano.

### **Estrés Hídrico en Plantas**

El estrés hídrico ocurre cuando la demanda de agua para la transpiración de la planta excede la capacidad de absorción de agua por las raíces, o cuando el contenido de agua en el suelo es insuficiente (Jones, 2004). Fisiológicamente, las plantas responden a esta condición mediante una serie de mecanismos adaptativos para conservar agua. Uno de los más importantes y tempranos es el cierre estomático (Rinza y cols., 2021). Los estomas son poros microscópicos, principalmente en la superficie de las hojas, que regulan el intercambio gaseoso ( $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ ) y la pérdida de agua por transpiración. Al cerrarse, la planta reduce significativamente la pérdida de vapor de agua hacia la atmósfera.

La transpiración, además de su rol en el transporte de agua y nutrientes, funciona como un mecanismo de termorregulación, enfriando la superficie foliar mediante la evaporación del agua (García Tejero y cols., 2015). Por lo tanto, la reducción de la tasa transpiratoria debido al cierre estomático provoca un aumento medible en la temperatura de la superficie de las hojas (Jones, 2004; Pineda y cols., 2021). Este incremento térmico es un indicador fisiológico directo y temprano del estrés hídrico, a menudo detectable antes de que aparezcan síntomas visuales como la marchitez o la decoloración foliar (Pineda y cols., 2021; Rinza y cols., 2021). La detección precoz de este cambio térmico es clave para intervenir con el riego antes de que el estrés cause daños irreversibles o mermas significativas en la producción.

## **Termografía Infrarroja (IRT) en la Agricultura de Precisión**

La termografía infrarroja (IRT) es una técnica no invasiva que permite capturar la radiación infrarroja emitida por la superficie de los objetos y convertirla en una imagen visible (termograma), donde cada color o nivel de gris representa una temperatura (Jones, 2004). Su aplicación en fisiología vegetal y ecofisiología se basa en la correlación directa entre la temperatura superficial de la hoja y diversos procesos fisiológicos, especialmente la transpiración y el estado hídrico (Jones, 2004; García Tejero y cols., 2015).

En la agricultura de precisión, la IRT se ha consolidado como una herramienta valiosa para monitorear el estrés hídrico en diversos cultivos (Poblete-Echeverría, Fuentes, Ortega-Farias, Gonzalez-Talice, y Yuri, 2023; Vieira y Ferrarezi, 2021). Permite evaluar la variabilidad espacial y temporal del estado hídrico dentro de una parcela, facilitando una gestión del riego más eficiente y localizada (García Tejero y cols., 2015). Uno de los índices más utilizados derivados de la termografía es el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI, por sus siglas en inglés), propuesto originalmente por Idso et al. (Idso y cols., 1981). El CWSI normaliza la diferencia entre la temperatura del dosel ( $T_c$ ) y la temperatura del aire ( $T_a$ ) utilizando referencias de temperaturas foliares en condiciones de máxima transpiración (límite inferior o  $T_{wet}$ ) y mínima transpiración (límite superior o  $T_{dry}$ ), proporcionando un indicador cuantitativo del nivel de estrés (valores entre 0 y 1) (Quezada y cols., 2020).

A pesar de su potencial demostrado, la adopción generalizada de la IRT en la agricultura se ha visto históricamente limitada por el alto costo de las cámaras termográficas de grado científico o industrial (García Tejero y cols., 2015). Sin embargo, avances recientes en la tecnología de sensores han propiciado la aparición de matrices de sensores infrarrojos de bajo costo, como el MLX90640 (Melexis, 2021), que, aunque con menor resolución espacial que las cámaras de alta gama, ofrecen una alternativa viable para aplicaciones específicas de monitoreo (Dong y cols.,

2024). Investigaciones como la de Dong et al. (Dong y cols., 2024) han explorado y validado el uso de estas tecnologías de bajo costo para el monitoreo de la temperatura del dosel en aplicaciones agrícolas, abriendo nuevas posibilidades para desarrollar herramientas de agricultura de precisión más asequibles y accesibles para un mayor número de productores. Este proyecto se inscribe en esta línea, buscando aprovechar el potencial de la termografía de bajo costo para abordar el desafío del manejo hídrico en el cultivo de arándano Biloxi.

### **1.7.2. Marco Legal**

El desarrollo del proyecto se adhiere a la normativa colombiana, cubriendo aspectos clave de propiedad intelectual, protección de datos y seguridad digital.

#### **Propiedad Intelectual, Derechos de Autor y Licenciamiento**

La gestión de la propiedad intelectual se rige por el **Acuerdo No. 04 de 2018** de la Universidad de Cundinamarca (Consejo Superior de la Universidad de Cundinamarca, 2018). Conforme a este y a los acuerdos del proyecto:

- **Derechos Morales:** La autoría moral del software y del presente documento corresponde a los estudiantes y a la directora del proyecto, reconociendo su contribución intelectual fundamental (Consejo Superior de la Universidad de Cundinamarca, 2018).
- **Derechos Patrimoniales:** Los derechos patrimoniales sobre el software desarrollado son cedidos a la **Universidad de Cundinamarca**, conforme a lo estipulado en el marco del proyecto y el estatuto (Consejo Superior de la Universidad de Cundinamarca, 2018).
- **Licencia del Software:** El código fuente del software desarrollado se libera bajo la **Licencia MIT**, permitiendo su uso, modificación y distribución de forma abierta, fomentando la colaboración y la innovación.

- **Uso Académico del Documento:** Se concede a la Universidad una licencia no exclusiva para el uso académico del presente documento, permitiendo su inclusión en repositorios institucionales para consulta y preservación (Consejo Superior de la Universidad de Cundinamarca, 2018).

## **Protección de Datos Personales**

El diseño del sistema respeta la **Ley Estatutaria 1581 de 2012** (Congreso de la República de Colombia, 2012), garantizando la privacidad y seguridad de los datos de usuario. En la fase actual, se aplican buenas prácticas de seguridad y se asegura el ejercicio de los derechos del titular. Se contempla que una futura explotación comercial requeriría cumplir obligaciones adicionales (ej. registro RNBD, política de tratamiento).

## **Seguridad Digital**

Las medidas de seguridad del software (autenticación, control de acceso) se alinean con la **Ley 1273 de 2009** sobre delitos informáticos (Congreso de la República de Colombia, 2009), protegiendo la integridad de los datos y previniendo accesos no autorizados al sistema.

## II. DOCUMENTACIÓN SOFTWARE

### 2.1. Plan de Proyecto

La gestión y planificación del proyecto se fundamentó en una adaptación del marco de trabajo ágil Scrum, tal como se describió en la sección de metodología. Este enfoque se eligió por su flexibilidad y su capacidad para adaptar el desarrollo a los hallazgos de la investigación de manera iterativa.

Para la gestión operativa de esta metodología, incluyendo la administración del *Product Backlog*, las historias de usuario y el seguimiento de los *Sprints*, se utilizó la herramienta de software de código abierto *Plane*.

La implementación de Scrum se adaptó a un contexto académico y de investigación, aplicando los siguientes elementos clave:

- **Historias de Usuario:** Todos los requerimientos funcionales del sistema, identificados en la primera fase del proyecto, se tradujeron en historias de usuario.
- **Product Backlog:** Se priorizaron las historias de usuario en un *Product Backlog*, que sirvió como la hoja de ruta principal para el desarrollo.
- **Sprints:** El trabajo de desarrollo se dividió en *Sprints*, con duraciones que oscilaron entre dos y tres semanas. Generalmente, cada *Product Backlog Item* (PBI) o conjunto de historias

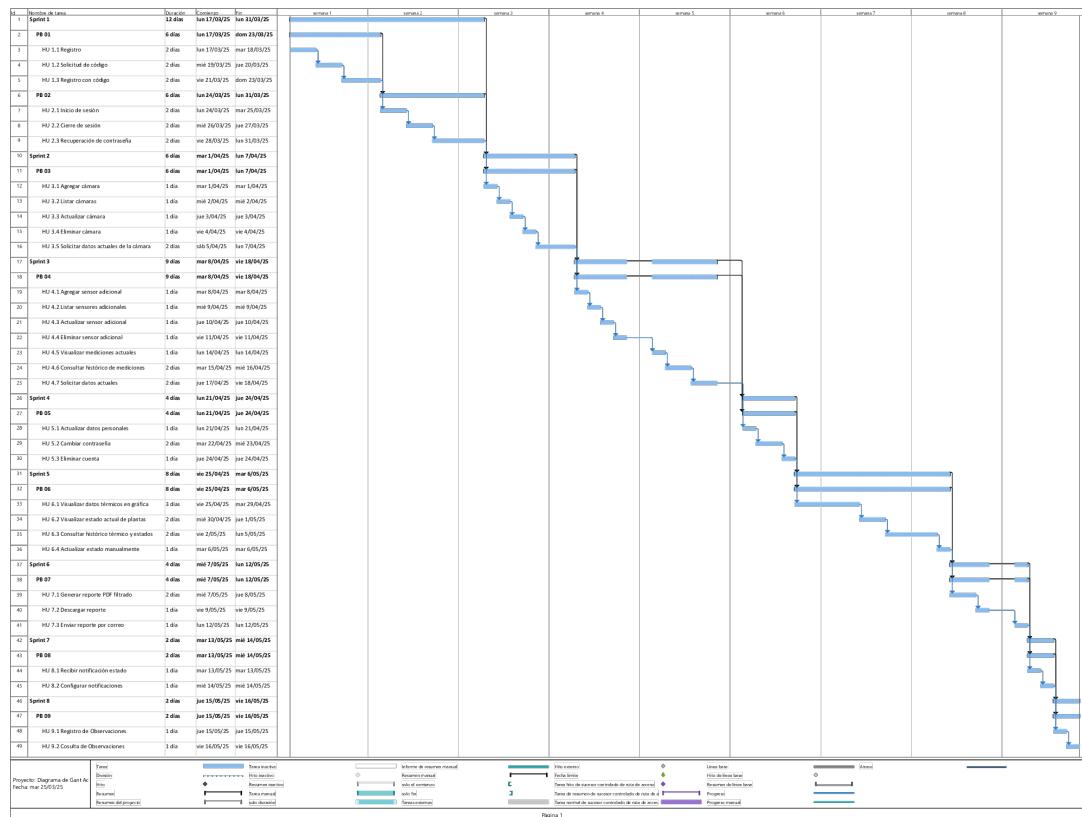
de usuario relacionadas se completaba dentro de un único *Sprint*.

- **Reuniones de Seguimiento:** Se realizaron reuniones semanales con la dirección del proyecto para revisar los adelantos, presentar el trabajo completado en el *Sprint* y ajustar las prioridades para el siguiente ciclo.

El cronograma detallado de ejecución del proyecto, que agrupa las tareas en los *Sprints* definidos, se presenta en el Diagrama de Gantt (Figura 2). Este diagrama ilustra la secuencia de las actividades, su duración y las dependencias entre las fases de investigación, desarrollo, integración y pruebas.

**Figura 2**

*Diagrama de Gantt del proyecto.*



## **2.2. Arquitectura del Software**

El presente capítulo detalla la arquitectura del software desarrollado para el sistema *Arandano IRT*. Se describe la estructura adoptada, los patrones de diseño implementados y las tecnologías seleccionadas, justificando las decisiones tomadas en función de los requerimientos funcionales y no funcionales del proyecto, así como de las lecciones aprendidas durante las fases iniciales de desarrollo.

El desarrollo del sistema partió de la construcción de un Prototipo Mínimo Viable (MVP), enfocado en validar las tecnologías centrales y las funcionalidades críticas de monitoreo y análisis. Esta fase inicial fue crucial, no solo para generar un conjunto de datos preliminar significativo (más de 3500 registros), sino también para identificar desafíos técnicos y refinar la arquitectura final. La experiencia con el MVP subrayó la importancia de una infraestructura resiliente. Un incidente específico, una interrupción prolongada del servicio debido a una falla en un proveedor externo (Cloudflare), motivó un rediseño orientado a minimizar las dependencias externas críticas y maximizar la autonomía operativa del sistema. Esta decisión estratégica ha resultado en una arquitectura robusta, evidenciada por un tiempo de actividad continuo superior a los 100 días desde su implementación final.

La arquitectura resultante se describe desde dos perspectivas complementarias: el diseño lógico, que aborda la organización interna del código y la aplicación del patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC); y la arquitectura física, que detalla la distribución de los componentes de software en la infraestructura de despliegue. Finalmente, se presenta el stack (recursos) tecnológico que sustenta el sistema.

## 2.2.1. Patrón Arquitectónico y Diseño Lógico

El sistema *Arandano IRT* adopta el patrón arquitectónico Modelo-Vista-Controlador (MVC), aprovechando las capacidades ofrecidas por el framework **ASP.NET Core 8**. Se optó por una arquitectura monolítica modular en lugar de un enfoque desacoplado (como una Single Page Application (SPA) con una API backend separada), considerando el alcance del proyecto y la eficiencia en el desarrollo para un equipo reducido, decisión validada durante la fase del MVP. Esta elección permite una estructura cohesiva y un despliegue simplificado, sin sacrificar la organización interna del código.

La implementación sigue la interpretación clásica del patrón MVC adaptada al ecosistema de ASP.NET Core, estructurando la aplicación en las siguientes capas lógicas principales, tomadas de la Arquitectura Cebolla (Onion Architecture), reflejadas en la organización de directorios del proyecto:

- **Capa de Presentación (Vista - View):** Responsable de la interfaz de usuario (UI) y la interacción directa con el usuario (:Persona). Esta capa se implementa principalmente mediante **Razor Pages** y componentes **Blazor/Razor** (.cshtml, ubicados en el directorio /Views. Estos componentes se renderizan en el servidor, generando el HTML que se envía al navegador del cliente. La lógica de presentación, el manejo de eventos de UI y las llamadas iniciales a la lógica de negocio residen aquí.
- **Capa de Control (Controlador - Controller):** Actúa como intermediario entre la Vista y el Modelo. Los controladores (.cs), situados en 3\_Presentation/Controllers, reciben las solicitudes HTTP entrantes (generalmente iniciadas por acciones del usuario en la Vista), interpretan los datos de la solicitud, invocan la lógica de negocio necesaria a través de los servicios de la capa de aplicación y seleccionan la Vista apropiada para devolver la respuesta al cliente.

- **Capa de Modelo (Model):** Esta capa encapsula la lógica de negocio central, las reglas del dominio y el acceso a los datos. Se organiza en subcapas para una mejor separación de responsabilidades:
  - **Dominio (0\_Domain):** Contiene las entidades principales del sistema (ej. Crop, Plant, Device), objetos de valor, enumeraciones (Enums) y reglas de negocio fundamentales que son independientes de la tecnología.
  - **Aplicación (1\_Application):** Orquesta los casos de uso. Contiene los Data Transfer Objects (DTOs) utilizados para la comunicación entre capas, las interfaces de los servicios de aplicación (Contracts) y sus implementaciones (Implementation). Los servicios de esta capa coordinan la lógica de negocio, interactuando con las entidades del Dominio y utilizando la capa de Infraestructura para tareas como la persistencia o el envío de correos.
  - **Infraestructura (2\_Infrastructure):** Implementa los detalles técnicos y las dependencias externas. Incluye la configuración del **DbContext de Entity Framework Core** para la persistencia de datos en PostgreSQL, la implementación de servicios externos (como envío de correos con Brevo, almacenamiento con MinIO), la gestión de la autenticación, tareas en segundo plano (*background services*) y otros aspectos transversales. Proporciona las implementaciones concretas para las abstracciones definidas en las capas de Aplicación.

La comunicación entre estas capas se gestiona principalmente a través de Inyección de Dependencias (Dependency Injection), un principio fundamental en ASP.NET Core. Por ejemplo, un componente Razor en la Vista puede injectar y utilizar un servicio definido en la capa de Aplicación. Este servicio, a su vez, puede injectar y utilizar el **ApplicationDbContext** (definido en Infraestructura) para consultar o modificar entidades del Dominio persistidas en la base de datos. Este

flujo unidireccional de dependencias (Presentación → Aplicación → Dominio ← Infraestructura) asegura un bajo acoplamiento y facilita la mantenibilidad y testabilidad del sistema. La integración entre el frontend (Razor/Blazor) y el backend (Controladores, Servicios) se realiza mediante llamadas a métodos dentro del mismo proceso de aplicación, característico de la arquitectura monolítica seleccionada.

### 2.2.2. Arquitectura Física e Infraestructura

La arquitectura física define la distribución de los componentes de software en los nodos de hardware y la infraestructura subyacente que soporta la operación del sistema *Arandano IRT*. Esta arquitectura ha sido diseñada priorizando la robustez y la autonomía operativa, como se discutió en la introducción de este capítulo. La Figura 3 ilustra la topología de despliegue.

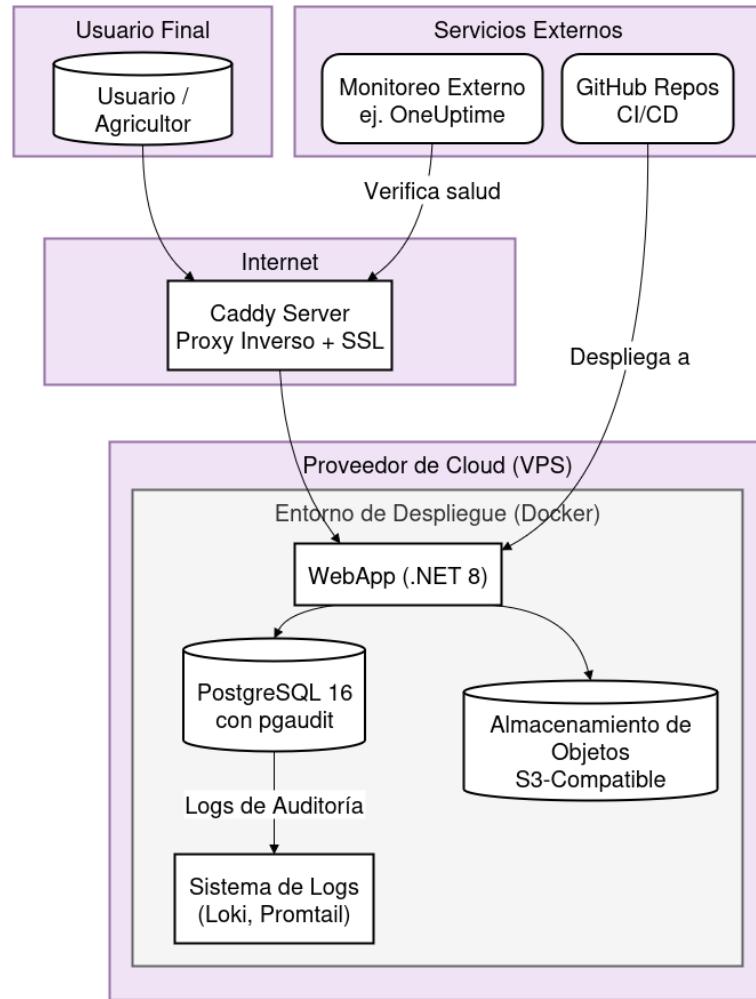
El sistema se despliega sobre dos nodos físicos principales:

1. **Servidor Central (Cloud VM):** Se utiliza una Máquina Virtual (VM) alojada en el proveedor de infraestructura como servicio (IaaS), específicamente DigitalOcean. Este nodo ejecuta el sistema operativo **Ubuntu Server 24.04 LTS** y alberga la totalidad de la pila de servicios backend, orquestada mediante Docker y Docker Compose. Los componentes de software que se ejecutan en contenedores dentro de esta VM incluyen:

- La aplicación principal **ASP.NET Core 8** (Backend MVC y API).
- El sistema gestor de base de datos **PostgreSQL 16**.
- El servicio de almacenamiento de objetos compatible con S3, **MinIO**, utilizado para las copias de seguridad de la base de datos y almacenamiento de archivos.
- La pila de observabilidad compuesta por **Loki/Promtail** para la agregación de logs y **Grafana** para la visualización y alertas.

**Figura 3**

*Diagrama de Despliegue Físico del Sistema Arandano IRT.*



- El proxy inverso **Caddy**, que gestiona el tráfico HTTPS entrante, la terminación TLS y el enrutamiento hacia los servicios correspondientes.

El servidor está protegido por firewalls a nivel de red (proveedor cloud) y a nivel de host (ufw), además de contar con Fail2Ban para la prevención de intrusiones.

2. **Dispositivo de Monitoreo (IoT Device):** Representa el hardware físico desplegado en campo cerca de las plantas de arándano. Este dispositivo integra los sensores ambientales y la

cámara térmica. Ejecuta un **firmware** embebido (desarrollado específicamente para el proyecto, como se detalla en el capítulo correspondiente) responsable de la captura periódica de datos (temperatura, humedad, imágenes térmicas y RGB), el preprocesamiento básico, y la transmisión segura de esta información al Servidor Central.

La comunicación entre estos nodos se realiza a través de protocolos de red estándar y seguros:

- **Dispositivo IoT → Servidor Central:** El firmware del dispositivo de monitoreo envía los datos recolectados (lecturas ambientales, estadísticas térmicas, logs) a la API expuesta por la aplicación ASP.NET Core 8 en el servidor. Esta comunicación se realiza exclusivamente sobre **HTTPS (puerto 443)**, asegurando el cifrado de la información en tránsito. El dispositivo se autentica ante la API mediante tokens de seguridad gestionados por el sistema .
- **Usuario (:Persona) → Servidor Central:** Los usuarios interactúan con la aplicación web a través de sus navegadores. Toda la comunicación entre el navegador del usuario y el servidor se realiza sobre **HTTPS (puerto 443)**, gestionada y asegurada por el proxy inverso Caddy, que maneja automáticamente los certificados TLS/SSL.

Esta arquitectura física centralizada en una VM gestionada con Docker simplifica el despliegue y mantenimiento, mientras que el uso de protocolos seguros garantiza la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos, lo que ha permitido tener un sistema resiliente y confiable en operación continua.

### 2.2.3. Stack Tecnológico

La selección de las tecnologías para el sistema *Arandano IRT* se basó en criterios de soporte comunitario, costos y alineación con la filosofía *"open Source Primero"* del proyecto, sin descartar el uso pragmático de servicios privativos donde ofrecían ventajas significativas en sus capas gratuitas. A continuación, se detallan los componentes clave del stack tecnológico implementado:

- **Framework de Desarrollo Backend:** Se seleccionó **.NET 8** con el lenguaje **C#**. Esta elección se fundamenta en su naturaleza multiplataforma, su ecosistema moderno de desarrollo, el alto rendimiento ofrecido por la plataforma y el robusto soporte de la comunidad y Microsoft. El uso de Entity Framework Core como ORM facilitó la interacción con la base de datos.
- **Tecnologías de Frontend (UI):** La interfaz de usuario se construyó utilizando **Razor Pages** y componentes **Blazor/Razor** dentro del mismo proyecto ASP.NET Core. Esta aproximación simplifica el desarrollo y despliegue al mantener una base de código unificada y aprovechar las capacidades de renderizado del lado del servidor. Se complementa con HTML5, CSS3 y JavaScript para la interactividad del cliente.
- **Sistema Gestor de Base de Datos (SGBD):** Se optó por **PostgreSQL 16**. Esta decisión se basa en su reputación como un SGBD relacional de código abierto potente, fiable, extensible (uso de la extensión `pgaudit`) y con un excelente manejo de tipos de datos complejos como JSONB, utilizado en varias tablas del sistema.
- **Infraestructura de Despliegue y Orquestación:**
  - **Proveedor IaaS:** Se utiliza **DigitalOcean** como proveedor de la máquina virtual, debido a que ofrece un crédito gratuito a estudiantes mediante el Github Student Pack 2025.
  - **Sistema Operativo:** **Ubuntu Server 24.04 LTS** fue seleccionado como el SO base por su estabilidad, amplio soporte y compatibilidad con el ecosistema de contenedores.
  - **Contenerización:** **Docker** y **Docker Compose** son pilares fundamentales, permitiendo empaquetar, desplegar y gestionar los diferentes servicios de forma aislada y reproducible.
  - **Proxy Inverso:** **Caddy** se emplea para gestionar el tráfico entrante, el enruteamiento a los contenedores y, crucialmente, la automatización completa de la gestión de certificados

TLS/SSL.

- **Almacenamiento de Objetos:** **MinIO** proporciona una solución de almacenamiento compatible con S3, auto-hospedada, utilizada específicamente para las copias de seguridad de la base de datos y almacenamiento de archivos (imágenes).
- **Pila de Observabilidad:** Para el monitoreo y diagnóstico del sistema, se implementó una solución basada en:
  - **Agregación de Logs:** **Loki** centraliza los logs generados por todos los contenedores.
  - **Recolección de Logs:** **Promtail** se configura como el agente encargado de recolectar y enviar los logs desde los contenedores a Loki.
  - **Visualización y Alertas:** **Grafana** se utiliza para consultar los logs almacenados en Loki mediante LogQL, visualizar métricas y configurar alertas proactivas.
- **Servicios Externos Complementarios:** Aunque se priorizó el software auto-hospedado, se integraron servicios externos estratégicos como **Cloudflare** para la gestión avanzada de DNS y seguridad perimetral (WAF, Anti-DDoS, Anti-Bots), **Cloudflare Turnstile** como CAPTCHA no intrusivo, y **Brevo** para el envío fiable de notificaciones por correo electrónico transaccional certificado.

Esta combinación de tecnologías proporciona una base sólida, escalable y mantenible para el sistema, equilibrando el control ofrecido por las soluciones auto-hospedadas de código abierto con la conveniencia y especialización de algunos servicios externos privativos.

## 2.3. Determinación de Requerimientos

**Tabla 2**

*Requerimiento Funcional RF01: Registro*

<b>Identificador</b>	RF01
<b>Nombre</b>	Registro
<b>Roles</b>	Administrador, Usuario
<b>Descripción</b>	El administrador puede registrarse en el sistema de detección proporcionando los datos solicitados en el formulario de registro. Para que un usuario se pueda registrar, debe solicitar el código de acceso proporcionado por el administrador para poder realizar correctamente el registro.

**Tabla 3**

*Requerimiento Funcional RF02: Inicio de sesión*

<b>Identificador</b>	RF02
<b>Nombre</b>	Inicio de sesión
<b>Roles</b>	Administrador, Usuario
<b>Descripción</b>	Permite a los diferentes roles acceder al sistema de detección con sus credenciales (usuario y contraseña), estas deben ser correctas para su acceso. Al finalizar, se podrá cerrar sesión. En caso tal de olvidar la contraseña, se tendrá la opción para recuperarla.

**Tabla 4***Requerimiento Funcional RF03: CRUD cámara*

<b>Identificador</b> RF03	
<b>Nombre</b>	CRUD cámara
<b>Roles</b>	Administrador
<b>Descripción</b>	Se podrán agregar módulos termográficos al sistema de detección para poder recibir y procesar los datos que estas envíen. Además de visualizar y actualizar el estado de cada módulo termográfico. En caso de ser necesario, se podrá eliminar la cámara del sistema de detección.

**Tabla 5***Requerimiento Funcional RF04: CRUD persona*

<b>Identificador</b> RF04	
<b>Nombre</b>	CRUD persona
<b>Roles</b>	Administrador, Usuario
<b>Descripción</b>	Los distintos roles podrán actualizar sus datos personales o contraseña. También podrán eliminar su cuenta.

**Tabla 6***Requerimiento Funcional RF05: Módulo de mediciones*

<b>Identificador</b> RF05	
<b>Nombre</b>	Módulo de mediciones
<b>Roles</b>	Administrador, Usuario
<b>Descripción</b>	El sistema de detección recopilará y mostrará los datos de las mediciones tomadas por otros sensores por medio de gráficas y un histórico.

**Tabla 7***Requerimiento Funcional RF06: Módulo de procesamiento*

<b>Identificador</b> RF06	
<b>Nombre</b>	Módulo de procesamiento
<b>Roles</b>	Administrador, Usuario
<b>Descripción</b>	El sistema de detección mostrará los datos recopilados por los módulos de cámara por medio de gráficas. Además, se debe mostrar el estado de cada planta y el histórico de datos de todas las plantas. El procesamiento de los datos térmicos indicará el estado de cada planta. Los roles podrán actualizar el estado proporcionado por el sistema de ser necesario.

**Tabla 8***Requerimiento Funcional RF07: Reportes*

<b>Identificador</b> RF07	
<b>Nombre</b>	Reportes
<b>Roles</b>	Administrador, Usuario
<b>Descripción</b>	Los diferentes roles podrán generar reportes sobre el estado de las plantas en formato PDF con base en los datos recopilados por los módulos de cámara y/o por el módulo de procesamiento. Se podrá escoger distintos filtros (una o varias plantas, lapsos de tiempo).

**Tabla 9***Requerimiento Funcional RF08: Notificaciones*

<b>Identificador</b> RF08	
<b>Nombre</b>	Notificaciones
<b>Roles</b>	Administrador, Usuario (como receptores)
<b>Descripción</b>	Se deben enviar notificaciones por correo electrónico a los distintos roles en el cual se puedan alertar sobre cambios de estado en las plantas y enviar notificaciones de seguridad.

**Tabla 10***Requerimiento Funcional RF09: Gestionar Observaciones*

<b>Identificador</b>	RF09
<b>Nombre</b>	Gestionar Observaciones
<b>Roles</b>	Administrador, Usuario
<b>Descripción</b>	<p>Permite a los usuarios registrar y consultar observaciones cualitativas sobre el estado de las plantas.</p> <p>Se utiliza una plantilla estandarizada para anotar aspectos visuales (color, textura, uniformidad, daños), asignar una calificación subjetiva y añadir notas, complementando los datos cuantitativos para la metodología mixta y el procesamiento de datos.</p>

**Tabla 11***Requerimiento No Funcional RNF01: Seguridad*

<b>Identificador</b>	RNF01
<b>Nombre</b>	Seguridad
<b>Roles</b>	N/A (Aplica al Sistema)
<b>Descripción</b>	El sistema de detección debe cumplir con los lineamientos y leyes establecidos para la protección, integridad y disponibilidad de los datos (Ley 1581 de 2012).

**Tabla 12**

*Requerimiento No Funcional RNF02: Copia de seguridad*

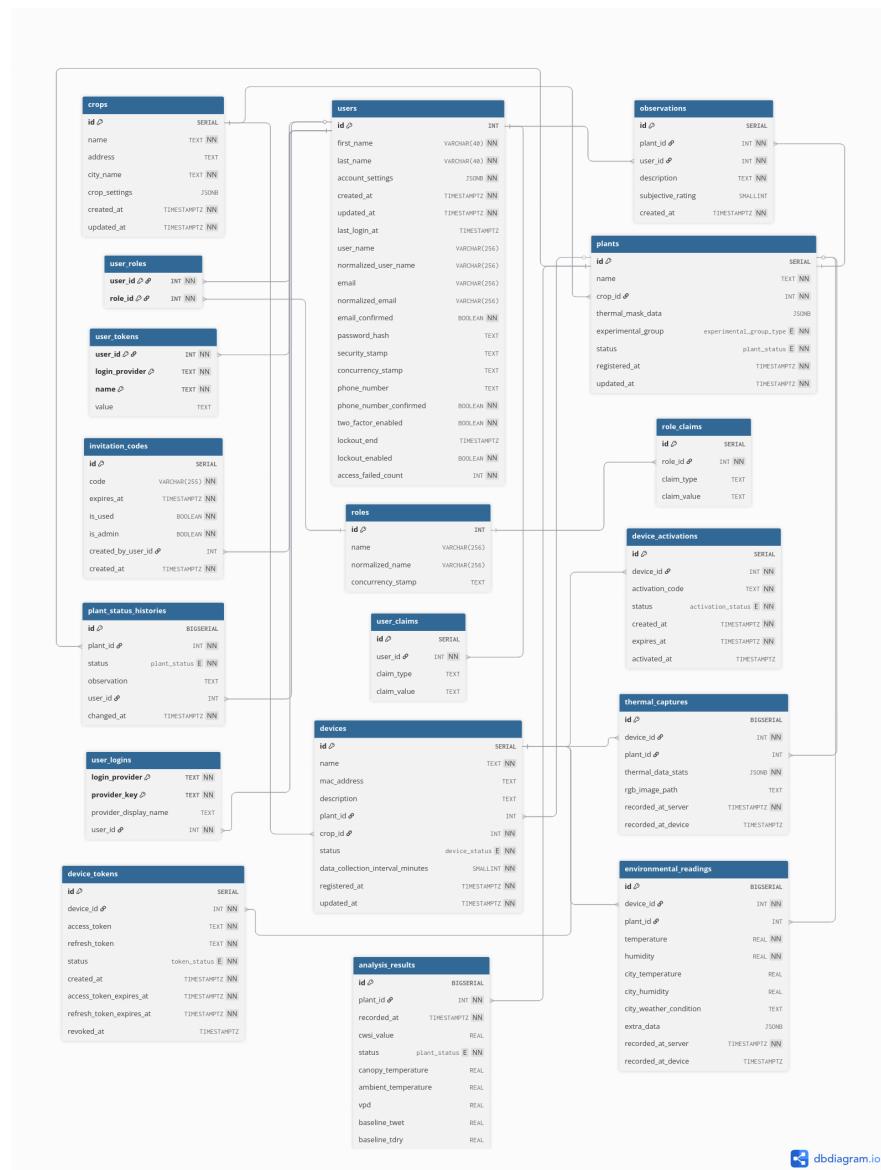
<b>Identificador</b> RNF02	
<b>Nombre</b>	Copia de seguridad
<b>Roles</b>	N/A (Aplica al Sistema)
<b>Descripción</b>	Se debe asegurar un respaldo de los datos en caso de presentarse alguna eventualidad no se vulnere la integridad de los datos. Esta copia de seguridad se debe hacer de forma automática y semanal.

## 2.4. Especificación del Diseño

### 2.4.1. Modelo de Entidad-Relación (MER)

**Figura 4**

*Diagrama Entidad-Relación del Sistema.*



La estructura de la base de datos diseñada para el sistema *Arandano IRT* organiza la información necesaria para el funcionamiento de la aplicación web y la gestión de los datos recolectados. Las tablas se agrupan funcionalmente para facilitar su comprensión, como se describe a continuación.

### **Grupo 1: Tipos Enumerados (ENUMs)**

Este grupo define tipos de datos personalizados que garantizan la consistencia y restringen los valores posibles para campos clave relacionados con estados o clasificaciones dentro del sistema. Estos tipos son fundamentales para mantener la integridad referencial semántica en diversas tablas.

- `device_status`: Cataloga los estados operativos de los dispositivos físicos de monitoreo.
- `activation_status`: Define las fases del proceso de activación de un nuevo dispositivo.
- `token_status`: Indica la validez de los tokens de autenticación para dispositivos.
- `plant_status`: Especifica los posibles estados de estrés hídrico detectados o asignados a una planta.
- `experimental_group_type`: Clasifica las plantas según su rol en configuraciones experimentales (ej. Control, Estrés, Monitoreado).

### **Grupo 2: Tablas Núcleo**

Constituyen las entidades centrales del dominio del sistema, representando los elementos fundamentales del monitoreo.

- `crops`: Representa cada unidad de cultivo o lote. Funciona como la entidad agrupadora principal, almacenando información geográfica y parámetros de configuración específicos del cultivo.

- **users**: Almacena la información de los usuarios registrados en la aplicación web, incluyendo datos personales, credenciales de acceso gestionadas por ASP.NET Core Identity y configuraciones de cuenta personalizadas.
- **plants**: Modela cada planta individual bajo monitoreo. Se vincula a un cultivo (**crop\_id**) y registra su estado de estrés hídrico actual (**status**), su clasificación experimental (**experimental\_group**) y datos asociados a la máscara térmica utilizada para el análisis de estrés hídrico.

### **Grupo 3: Identidad y Autenticación de Usuarios (ASP.NET Core Identity)**

Este conjunto de tablas implementa el esquema estándar de ASP.NET Core Identity, gestionando de forma robusta la autenticación, autorización basada en roles y la seguridad de las cuentas de usuario de la aplicación web.

- **roles, user\_roles**: Definen los roles disponibles en el sistema y establecen la relación muchos-a-muchos entre usuarios y roles.
- **user\_claims, role\_claims**: Permiten la asignación de permisos granulares (claims) directamente a usuarios o a roles, facilitando un modelo de autorización flexible.
- **user\_logins, user\_tokens**: Gestionan la integración con proveedores de identidad externos y el almacenamiento de tokens para funciones como la confirmación de correo o el restablecimiento de contraseña.
- **invitation\_codes**: Administra un sistema de registro basado en invitaciones, controlando la generación, validez y uso de códigos únicos para la creación de nuevas cuentas de usuario, vinculando opcionalmente la invitación a quien la generó.

## **Grupo 4: Gestión y Autenticación de Dispositivos**

Este grupo se enfoca en el registro, seguimiento del estado y la autenticación segura de los dispositivos de hardware (sensores, cámaras térmicas) responsables de la recolección de datos en campo.

- **devices:** Registra cada dispositivo físico, asociándolo a un cultivo y opcionalmente a una planta específica. Almacena metadatos como el nombre, descripción, estado operativo y la frecuencia configurada para la recolección de datos.
- **device\_activations:** Facilita el proceso seguro de incorporación (*onboarding*) de nuevos dispositivos al sistema mediante códigos de activación de un solo uso, registrando el estado y temporalidad de dicho proceso.
- **device\_tokens:** Almacena los tokens que permiten a los dispositivos autenticarse ante la API del sistema para el envío seguro de datos, gestionando su ciclo de vida (activo/revocado) y fechas de expiración.

## **Grupo 5: Recolección y Análisis de Datos**

Este grupo es fundamental, ya que almacena las mediciones directas de los sensores, las observaciones cualitativas y los resultados derivados del procesamiento y análisis realizado por el sistema.

- **environmental\_readings:** Persiste las series temporales de datos ambientales (temperatura, humedad) recolectadas por cada dispositivo, incluyendo timestamps tanto del dispositivo como del servidor y opcionalmente, datos climáticos externos contextuales.
- **thermal\_captures:** Almacena los metadatos y estadísticas clave extraídas de cada captura termográfica (temperaturas mínima, máxima, promedio, histograma), así como la referencia

a la imagen RGB asociada (almacenada externamente). Incluye timestamps del dispositivo y del servidor.

- **observations:** Permite a los usuarios registrar evaluaciones cualitativas manuales sobre el estado de las plantas, proporcionando un complemento a los datos cuantitativos de los sensores. Se vincula a la planta observada y al usuario que realizó el registro.
- **plant\_status\_histories:** Funciona como un log de auditoría específico para el estado de las plantas. Registra cada cambio en el **plant\_status**, indicando la fecha, el nuevo estado, la planta afectada y si el cambio fue realizado manualmente por un usuario o automáticamente por el sistema tras un análisis.
- **analysis\_results:** Guarda los resultados cuantitativos generados por los algoritmos de análisis del sistema, como el valor calculado del Índice de Estrés Hídrico (CWSI). Almacena el resultado junto con la fecha, la planta analizada y otros parámetros relevantes para la trazabilidad del cálculo, asegurando la unicidad por planta y timestamp.

#### 2.4.2. Diagramas de Casos de Uso

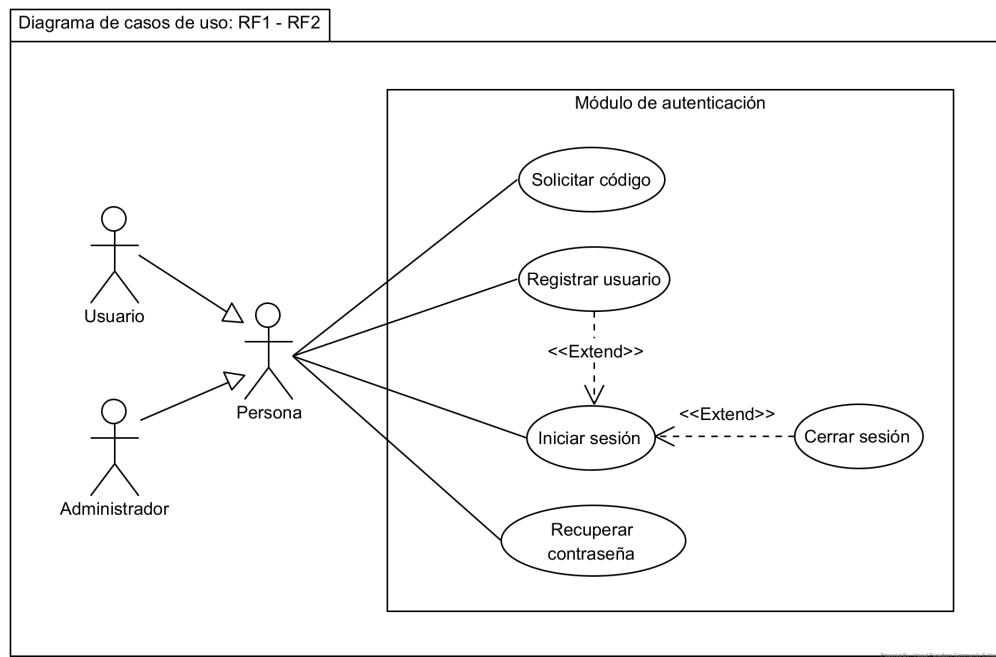
Un caso de uso es una unidad coherente de funcionalidad externamente visible proporcionada por un clasificador (denominado sistema) y expresada mediante secuencias de mensajes intercambiados por el sistema y uno o más actores de la unidad del sistema (Rumbaugh, Jacobson, y Booch, 2007). El propósito de un caso de uso es definir una pieza de comportamiento coherente sin revelar la estructura interna del sistema (Rumbaugh y cols., 2007).

Esta sección presenta los diagramas de casos de uso que modelan las funcionalidades principales ofrecidas por el sistema. Estos diagramas ilustran, desde una perspectiva de alto nivel, cómo interactúan los diferentes actores principalmente el **Usuario**, el **Administrador** y, en ciertos escenarios, el propio **Sistema** con las funcionalidades clave del sistema (representadas por elipses).

Cada diagrama está generalmente asociado a un módulo funcional o a un Requerimiento Funcional (RF) específico identificado en la especificación de requisitos, utilizando la notación estándar UML para representar actores, casos de uso, límites del sistema y relaciones como «Extend» o «Include». El objetivo es proporcionar una visión clara del alcance funcional del sistema desde el punto de vista de sus usuarios.

**Figura 5**

*Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Usuarios (RF1, RF2).*



La Figura 5 detalla los casos de uso correspondientes al Módulo de autenticación del sistema, cubriendo las funcionalidades de registro e inicio de sesión (RF01 y RF02). Los actores que interactúan con este módulo son el Usuario y el Administrador, ambos representados mediante la generalización Persona. A continuación se describe cada caso de uso:

### **Caso de Uso: Solicitar código**

Permite a un **Usuario** (actuando como **Persona**) solicitar un código de acceso. Según RF01, este código es necesario para que un **Usuario** pueda registrarse y asociarse a un cultivo existente, y debe ser proporcionado previamente por un **Administrador**. Para registrar al primer administrador, se debe ingresar con el usuario temporal **Bootstrap**, con las credenciales definidas en la instalación inicial del sistema y enviar el código al primer administrador.

### **Caso de Uso: Registrar usuario**

Corresponde a la funcionalidad RF01. Permite a **Persona** crear una nueva cuenta en el sistema. El flujo tanto para el **Administrador** como para un **Usuario** necesitan ingresar un código de acceso válido (obtenido a través del caso de uso **Solicitar código**) para completar su registro dentro del sistema.

### **Caso de Uso: Iniciar sesión**

Representa la funcionalidad principal de RF02, permitiendo a **Persona** acceder al sistema mediante la validación de sus credenciales (correo electrónico y contraseña). Un inicio de sesión exitoso otorga acceso a las funcionalidades correspondientes al rol del usuario (**Administrador** o **Usuario**). Este caso de uso es la base para poder interactuar con el resto del sistema y puede ser extendido por **Cerrar sesión**.

### **Caso de Uso: Recuperar contraseña**

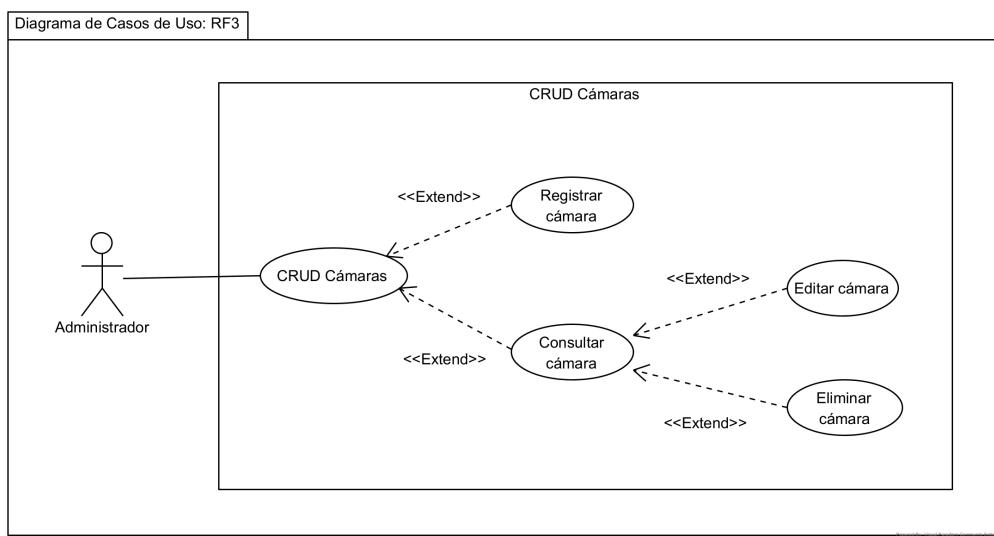
Forma parte de la funcionalidad RF02. Ofrece a **Persona** un mecanismo para restablecer su contraseña si la ha olvidado. Típicamente, esto implica un proceso de verificación a través del correo electrónico registrado para garantizar la seguridad.

## Caso de Uso: Cerrar sesión

Este caso de uso extiende (‘«Extend»’) a **Iniciar sesión**, para completar su funcionamiento. Representa la acción explícita y opcional que realiza **Persona** para terminar de forma segura su sesión activa dentro de la aplicación, después de haber iniciado sesión y realizado otras tareas.

**Figura 6**

*Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Cámaras (RF3).*



La Figura 6 describe los casos de uso asociados a la gestión (CRUD - Crear, Leer, Actualizar, Borrar) de los dispositivos de cámara o módulos termográficos, funcionalidad identificada como RF03 y exclusiva para el actor **Administrador**. El diagrama presenta un caso de uso central y las operaciones específicas que extienden su funcionalidad:

## Caso de Uso: CRUD Cámaras

Representa la funcionalidad principal o el punto de acceso para que el **Administrador** gestione los módulos termográficos registrados en el sistema. Este caso de uso, descrito en RF03, se ve extendida (‘«Extend»’) por operaciones más específicas como registrar o consultar cámaras.

### **Caso de Uso: Registrar cámara**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de CRUD Cámaras. Permite al Administrador añadir un nuevo módulo termográfico al sistema (operación Create). Esto incluye la configuración inicial del dispositivo dentro de la plataforma.

### **Caso de Uso: Consultar cámara**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de CRUD Cámaras. Permite al Administrador buscar y visualizar la información detallada y el estado actual de los módulos termográficos ya registrados en el sistema (operación Read). Este caso de uso sirve como punto de partida para otras acciones opcionales.

### **Caso de Uso: Editar cámara**

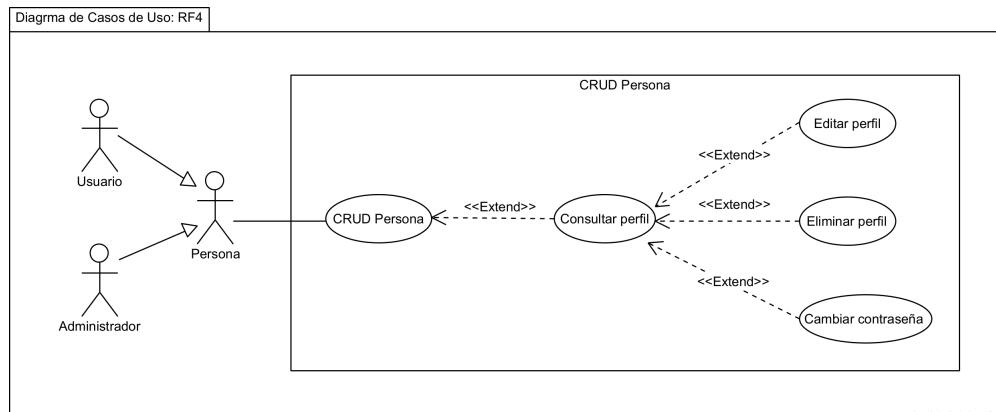
Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Consultar cámara. Una vez que el Administrador ha consultado los detalles de una cámara específica, tiene la opción de modificar su configuración, nombre, descripción o actualizar su estado dentro del sistema (operación Update).

### **Caso de Uso: Eliminar cámara**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Consultar cámara. Después de consultar o seleccionar una cámara, el Administrador puede optar por eliminar permanentemente el registro de ese dispositivo del sistema (operación Delete), usualmente si el dispositivo se da de baja o ya no se utiliza.

**Figura 7**

*Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Perfiles (RF4).*



La Figura 7 detalla los casos de uso relacionados con la gestión del perfil de usuario dentro del sistema, funcionalidad descrita en RF04. Estas operaciones pueden ser realizadas tanto por el **Usuario** como por el **Administrador**, representados por la generalización **Persona**, sobre la información de su propia cuenta. El diagrama se centra en el módulo o funcionalidad **CRUD Persona**:

### Caso de Uso: CRUD Persona

Este caso de uso actúa como el punto de entrada general para que **Persona** administre la información asociada a su perfil en el sistema, tal como se indica en RF04. La funcionalidad principal que extiende (‘«Extend»’) esta gestión es **Consultar perfil**.

### Caso de Uso: Consultar perfil

Extiende (‘«Extend»’) la funcionalidad de **CRUD Persona**. Permite a **Persona** visualizar sus propios datos de perfil registrados en la aplicación (operación de Leer). Esta consulta es, generalmente, el paso previo necesario para poder realizar modificaciones o eliminar la cuenta.

### **Caso de Uso: Editar perfil**

Extiende (‘«Extend»’) la funcionalidad de Consultar perfil. Una vez que Persona visualiza su perfil, este caso de uso le permite modificar sus datos personales registrados, como nombre, apellido, correo electrónico o preferencias de notificación (operación de Actualizar datos), de acuerdo con RF04.

### **Caso de Uso: Eliminar perfil**

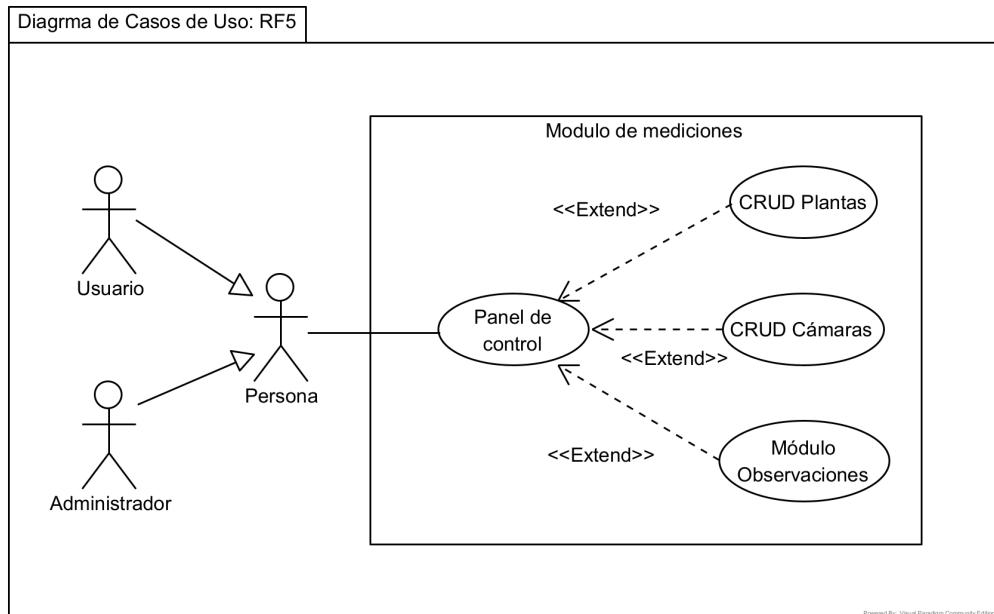
Extiende (‘«Extend»’) la funcionalidad de Consultar perfil. Habilita a Persona para solicitar la eliminación permanente de su cuenta y datos asociados del sistema (operación de Borrar), como lo permite RF04. Esta acción se realiza típicamente desde la vista del perfil del usuario.

### **Caso de Uso: Cambiar contraseña**

Extiende (‘«Extend»’) la funcionalidad de Consultar perfil. Permite a Persona iniciar el proceso para actualizar su contraseña de acceso al sistema (operación de Actualizar contraseña), como se menciona en RF04. Usualmente, esta opción está disponible dentro de la sección de gestión o consulta del perfil.

**Figura 8**

Diagrama de Casos de Uso para el Módulo de Mediciones (RF5).



La Figura 8 presenta los casos de uso asociados al **Modulo de mediciones** del sistema. Este módulo, accesible por los actores **Usuario** y **Administrador** (generalizados como **Persona**), funciona como el panel de control principal o *Dashboard* tras el inicio de sesión. A continuación, se describen los casos de uso involucrados:

### Caso de Uso: Panel de control

Este caso de uso representa la pantalla principal que visualiza **Persona** al interactuar con el módulo de mediciones. Su función primordial, relacionada con RF05, es mostrar de forma consolidada los datos clave recopilados por los sensores y cámaras, típicamente mediante gráficas de las últimas 24 horas y los últimos valores registrados. Proporciona una visión general del estado del cultivo y sirve como punto central desde el cual se puede acceder ('«Extend»') a otras funcionalidades específicas de gestión.

### **Caso de Uso: CRUD Plantas**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad del Panel de control. Permite a Persona gestionar las plantas registradas en el sistema: añadir nuevas plantas, consultar su información, editar sus detalles o eliminarlas (Crear, Leer, Actualizar, Borrar). Esta es una funcionalidad esencial para administrar las entidades principales monitoreadas (PlantData).

### **Caso de Uso: CRUD Cámaras**

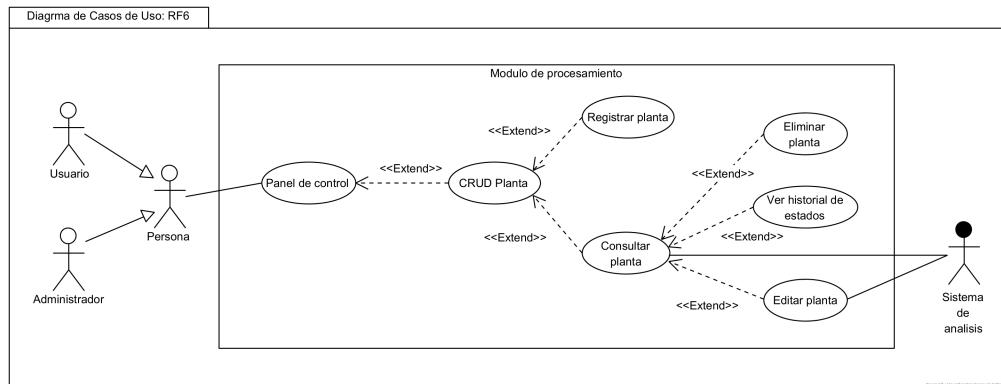
Extiende ('«Extend»') la funcionalidad del Panel de control, proporcionando un acceso a la gestión de los dispositivos (módulos termográficos y sensores). Es importante resaltar que, aunque el Panel de control es accesible por Persona, la funcionalidad específica de CRUD Cámaras está restringida al rol Administrador, tal como se definió en RF03. Permite al Administrador realizar las operaciones de Crear, Leer, Actualizar y Borrar sobre los dispositivos desde este panel.

### **Caso de Uso: Módulo Observaciones**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad del Panel de control. Representa la funcionalidad añadida para gestionar las observaciones cualitativas realizadas sobre las plantas. Permite a Persona registrar y consultar notas descriptivas sobre aspectos visuales (decoloraciones, uniformidad, notas sobre hojas/tallos) o calificaciones subjetivas del estado de la planta. Esta funcionalidad es clave para cumplir con la metodología de investigación y permitir una mejor compresión de los datos recopilados.

**Figura 9**

*Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Plantas (RF6).*



La Figura 9 ilustra los casos de uso pertenecientes al **Modulo de procesamiento**, cuya funcionalidad principal (descrita en RF06) es la gestión de las plantas y la visualización de su estado y datos procesados. Los actores involucrados son el **Usuario** y el **Administrador** (generalizados como **Persona**), además de un actor externo, el **Sistema de análisis**.

### Caso de Uso: Panel de control

Reutilizado del diagrama anterior (Figura 8), sirve como punto de entrada general para **Persona**, desde donde se puede acceder ('«Extend»') a la funcionalidad específica de gestión de plantas (**CRUD Planta**).

### Caso de Uso: CRUD Planta

Actúa como el caso de uso central para la administración del ciclo de vida de las plantas dentro de este módulo. Es accedido desde el **Panel de control** y engloba las operaciones fundamentales sobre las plantas, siendo extendido ('«Extend»') por acciones más específicas como **Registrar planta** y **Consultar planta**.

### **Caso de Uso: Registrar planta**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de CRUD Planta. Permite a Persona añadir una nueva planta al sistema (operación Create), registrando su información inicial para comenzar el monitoreo.

### **Caso de Uso: Consultar planta**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de CRUD Planta. Permite a Persona visualizar (Leer) la información detallada de una planta específica. Principalmente, según RF06, mostrar su estado actual (resultado del procesamiento de datos). Este caso de uso también es utilizado por el Sistema de análisis externo, para consultar el estado o datos procesados de las plantas. Sirve como base para otras operaciones extendidas.

### **Caso de Uso: Editar planta**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Consultar planta. Permite a Persona modificar (Actualizar) la información asociada a una planta existente. Como se especifica en RF06, esto incluye la capacidad de los usuarios para actualizar manualmente el estado asignado a la planta si lo consideran necesario tras una revisión. Este caso de uso también es utilizado por el Sistema de análisis externo, para actualizar el estado de una planta después de procesar los datos obtenidos de los sensores y cámaras.

### **Caso de Uso: Eliminar planta**

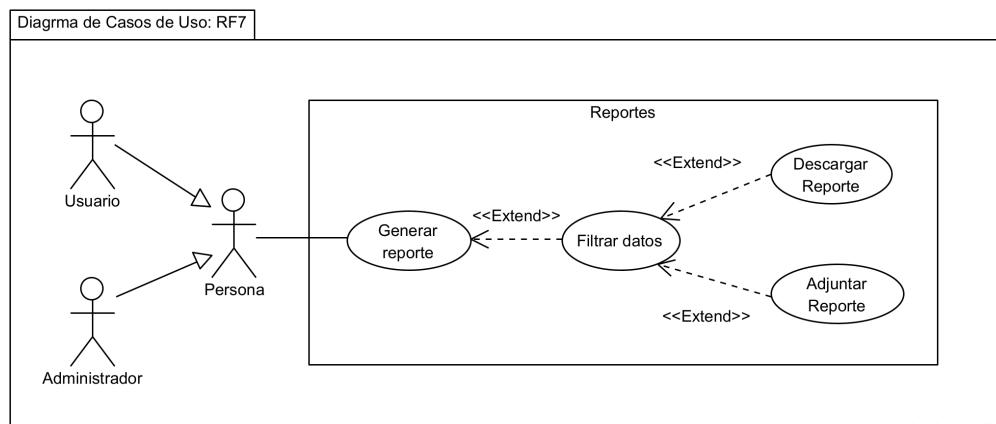
Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Consultar planta. Otorga a Persona la capacidad de eliminar (Borrar) el registro de una planta del sistema, por ejemplo, si la planta física es retirada del cultivo.

## Caso de Uso: Ver historial de estados

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Consultar planta. Permite a Persona acceder y visualizar el registro histórico de los cambios de estado que ha tenido una planta a lo largo del tiempo, funcionalidad explícitamente mencionada en RF06 para el seguimiento de la condición de las plantas.

**Figura 10**

*Diagrama de Casos de Uso para la Generación de Reportes (RF7).*



La Figura 10 presenta los casos de uso correspondientes a la generación de **Reportes** del sistema, funcionalidad descrita en RF07. Tanto el **Usuario** como el **Administrador** (generalizados como **Persona**) pueden acceder a estas funcionalidades para obtener informes sobre el estado de las plantas y otros módulos del sistema.

## Caso de Uso: Generar reporte

Este es el caso de uso principal que inicia **Persona** para solicitar la creación de un informe. Principalmente, el sistema compila la información relevante sobre el estado de las plantas basándose en los datos recopilados y procesados. El resultado es un reporte consolidado que se genera en formato PDF.

### **Caso de Uso: Filtrar datos**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Generar reporte. Proporciona a Persona la opción de aplicar criterios específicos para refinar el contenido del informe antes de su generación final. Por ejemplo, filtrar por planta(s) específica(s) o por lapsos de tiempo.

### **Caso de Uso: Descargar Reporte**

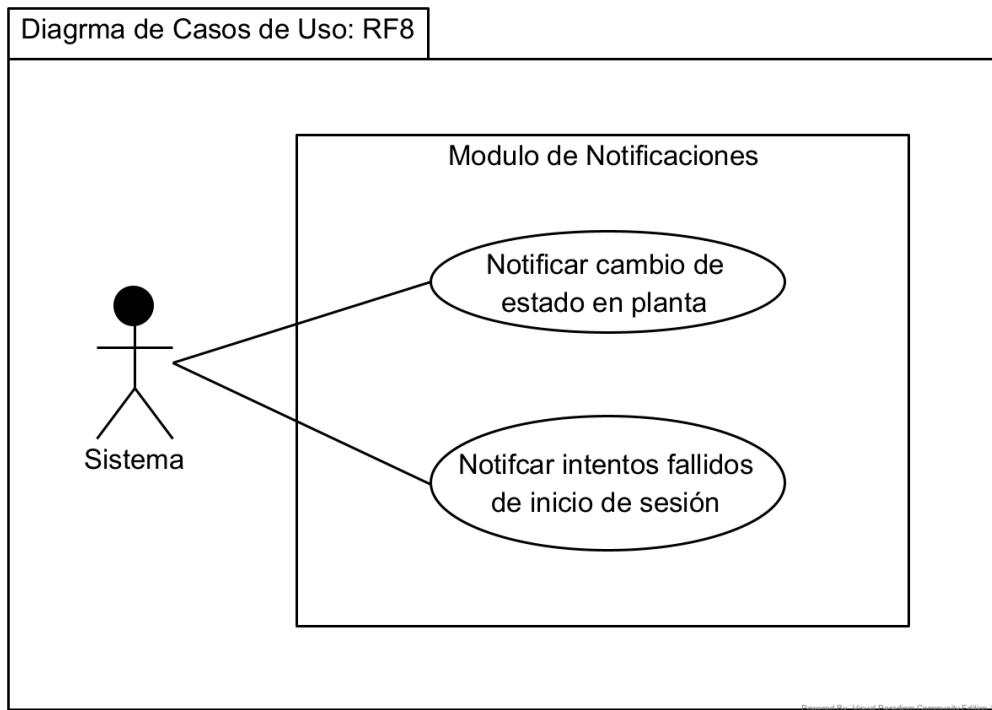
Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Filtrar datos (y, por lo tanto, la de Generar reporte). Una vez que el reporte ha sido generado (y posiblemente filtrado), este caso de uso permite a Persona descargar el archivo resultante (en formato PDF) a su dispositivo local para su consulta o almacenamiento.

### **Caso de Uso: Adjuntar Reporte**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Filtrar datos. Representa una opción disponible después de generar (y filtrar) el reporte. Permite de adjuntar el reporte generado por medio de un correo electrónico del usuario autenticado.

**Figura 11**

*Diagrama de Casos de Uso para las Notificaciones (RF8).*



La Figura 11 ilustra los casos de uso del **Modulo de Notificaciones**, que corresponden a la funcionalidad descrita en RF08. En este módulo, el actor principal que inicia las acciones es el propio **Sistema**, indicando que estas notificaciones son procesos automatizados. Estas alertas se envían por correo electrónico a los roles **Administrador** y **Usuario** del sistema.

### **Caso de Uso: Notificar cambio de estado en planta**

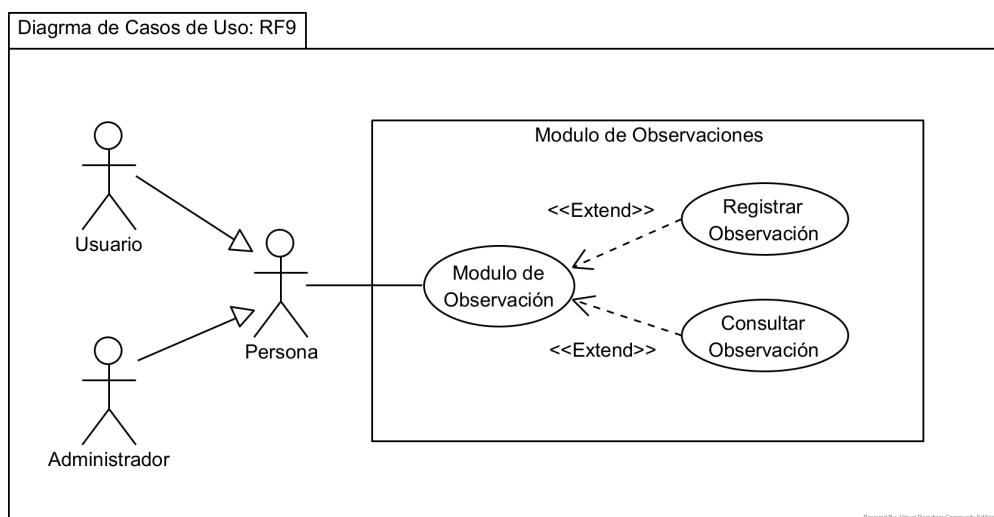
Este caso de uso es ejecutado automáticamente por el **Sistema**. Se activa cuando se produce un cambio significativo en el estado registrado de una planta (por ejemplo, al pasar de 'Saludable' a 'No Saludable' o viceversa, basado en el procesamiento de datos o una actualización manual). El objetivo es alertar proactivamente a los usuarios relevantes (**Administrador**, **Usuario**) por correo electrónico sobre la nueva condición de la planta, facilitando una respuesta rápida.

## Caso de Uso: Notificar intentos fallidos de inicio de sesión

Iniciado también por el Sistema, este caso de uso forma parte de las "notificaciones de seguridad" mencionadas en RF08. Se activa cuando el sistema detecta una actividad potencialmente sospechosa, como múltiples intentos fallidos de inicio de sesión asociados a una cuenta de usuario. El propósito es informar al usuario afectado, mediante correo electrónico, sobre estos intentos para que pueda verificar la seguridad de su cuenta y tomar acciones si es necesario (ej. cambiar contraseña).

**Figura 12**

*Diagrama de Casos de Uso para el Módulo de Observaciones (RF9).*



La Figura 12 describe los casos de uso para el **Modulo de Observaciones**. Esta funcionalidad, descrita en RF09, es esencial para la metodología mixta del proyecto, permitiendo la recolección de datos cualitativos sobre las plantas. Los actores **Usuario** y **Administrador** (generalizados como **Persona**) interactúan con este módulo.

### **Caso de Uso: Modulo de Observación**

Este caso de uso representa el punto de entrada principal para que Persona interactúe con las funcionalidades de registro y consulta de observaciones cualitativas de las plantas. Sirve como interfaz para acceder a las operaciones específicas que extienden ('«Extend»') su funcionalidad.

### **Caso de Uso: Registrar Observación**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad del Modulo de Observación. Permite a Persona registrar una nueva observación cualitativa sobre una planta específica, utilizando la plantilla definida en el diseño experimental. Esto incluye seleccionar el estado general visual, describir cambios, anotar aspectos específicos de color/textura y hojas/tallos, asignar una calificación subjetiva y opcionalmente notas adicionales. Estos datos son cruciales para complementar los datos cuantitativos y tener una mejor comprensión de los datos.

### **Caso de Uso: Consultar Observación**

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad del Modulo de Observación. Permite a Persona buscar y visualizar las observaciones cualitativas previamente registradas para una planta. Esto facilita el seguimiento de la evolución visual descrita en el diseño experimental y la comparación con los datos cuantitativos (termografía, sensores).

#### **2.4.3. Diagramas de Secuencia**

Un diagrama de secuencia muestra un conjunto de mensajes ordenados en una secuencia temporal (Rumbaugh y cols., 2007). Cada rol se muestra como una línea de vida es decir, una línea vertical que representa al rol a lo largo del tiempo a través de la interacción completa (Rumbaugh y cols., 2007). Los mensajes se muestran con flechas entre líneas de vida (Rumbaugh y cols., 2007).

## Líneas de Vida Principales

Los diagramas de secuencia presentados en este documento ilustran las interacciones entre diferentes componentes del sistema para realizar casos de uso específicos. A continuación, se presenta una descripción general de las líneas de vida (*lifelines*) que aparecen de forma recurrente, representando los actores y las capas arquitectónicas principales del sistema, el cual sigue el patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC) y organizado mediante carpetas que simulan las capas de la arquitectura cebolla (Onion Architecture).

- **:Persona:** Representa al usuario final que interactúa con el sistema a través de la interfaz gráfica. Dependiendo del contexto, puede ser un **Usuario** o un **Administrador**. Es el iniciador de las secuencias asociadas a funcionalidades interactivas.
- **:Vista:** Simboliza la interfaz de usuario (capa *View* en MVC) con la que interactúa **:Persona**. Esta línea de vida representa la aplicación cliente (ej. aplicación web ejecutándose en el navegador). Sus responsabilidades incluyen presentar información al usuario, capturar sus entradas, realizar validaciones del lado del cliente y enviar solicitudes (vía HTTP/S) a los puntos de entrada del backend (**:Controlador**), así como renderizar las respuestas recibidas.
- **:Controlador:** Representa la capa de Controladores (*Controller* en MVC) en el backend. Actúa como el punto de entrada para las solicitudes HTTP provenientes de **:Vista**. Es responsable de interpretar la solicitud, invocar la lógica de negocio apropiada interactuando con el **:Modelo** (a través de servicios), coordinar las operaciones necesarias y seleccionar la **:Vista** adecuada (o devolver datos, como API) para generar la respuesta al cliente.
- **:Modelo:** Simboliza la capa del Modelo (*Model* en MVC). Encapsula los datos de la aplicación (entidades de dominio como Planta, Cultivo, Usuario), la lógica de negocio fundamental, las reglas de validación y la interacción con la capa de persistencia de datos. El **:Controlador**

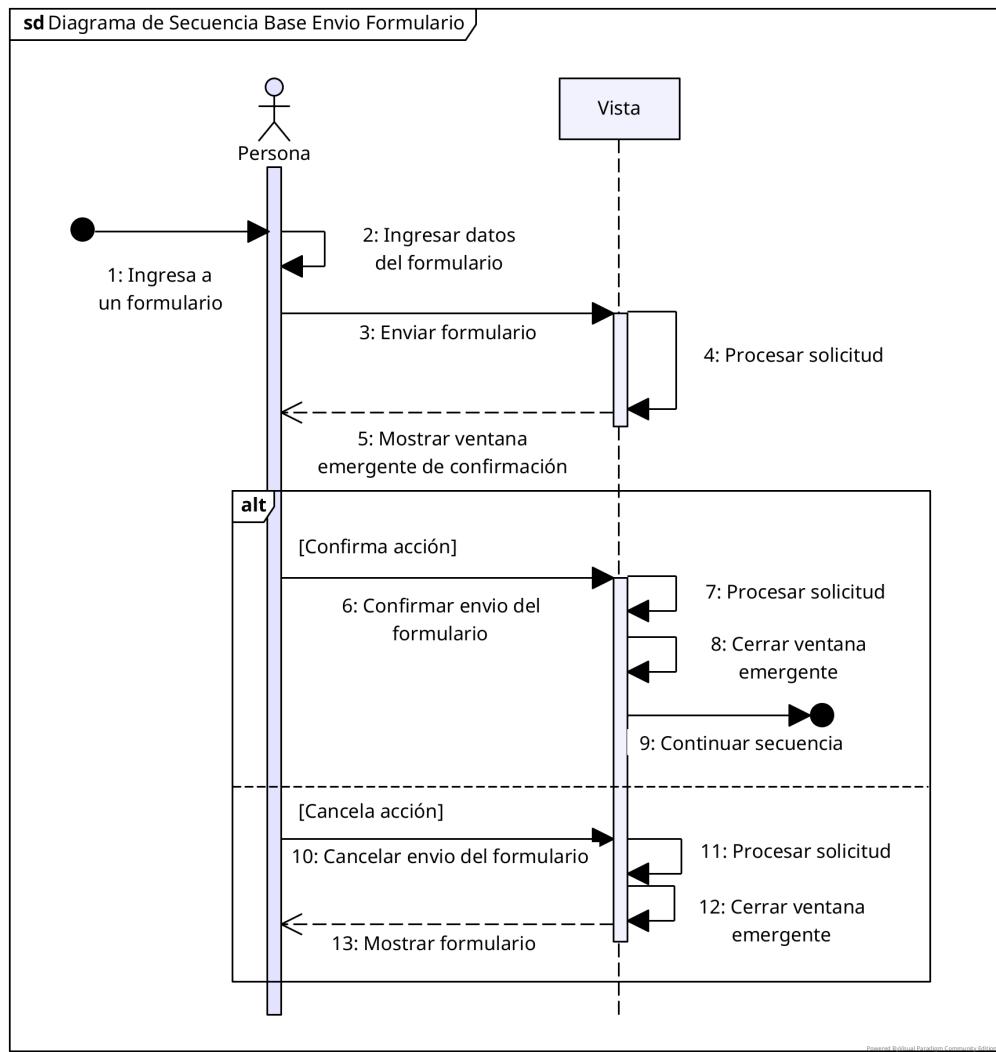
utiliza el :Modelo para leer o modificar el estado de la aplicación. La interacción directa con la base de datos (PostgreSQL) se realiza a través del ORM Entity Framework Core, orquestado mediante servicios, utilizando las entidades definidas en el Modelo.

Generalmente, el flujo de una solicitud iniciada por el usuario sigue la secuencia :Persona → :Vista → :Controlador. El :Controlador interactúa entonces con el :Modelo (capas de servicio que usan el Modelo) para procesar la solicitud y acceder a los datos. Finalmente, el :Controlador selecciona una :Vista (o prepara una respuesta de datos) que se envía de vuelta a :Persona a través de la :Vista original: :Controlador → :Vista → :Persona. Esta estructura promueve la separación de responsabilidades característica del patrón MVC.

Es importante señalar que aquellos diagramas que introducen líneas de vida con roles particulares no cubiertos en la descripción general (como la línea de vida :Camara detallada en la Figura20) o aquellos que representan patrones de interacción fundamentales y reutilizables (como el flujo base para envío de formularios mostrado en la Figura13) incluyen una descripción textual específica adjunta. Para los diagramas de secuencia restantes, se entiende que siguen el patrón general de interacción entre :Vista, :Controlador y :Modelo, utilizando las responsabilidades asignadas a cada línea de vida según se describió previamente.

**Figura 13**

Diagrama de secuencia base: Envío de formulario.



### Líneas de Vida Involucradas

Las líneas de vida principales en este diagrama base son:

- : **Persona**: Representa al usuario (Usuario o Administrador) que interactúa con la interfaz gráfica del sistema. Es quien inicia la acción, ingresa los datos y toma la decisión final de confirmar o cancelar el envío.

- :Vista: Representa el componente de la interfaz de usuario (la pantalla o ventana específica) que contiene el formulario. Recibe los datos ingresados, gestiona el proceso de envío inicial y maneja el diálogo de confirmación con el usuario.

## Descripción del Flujo Genérico

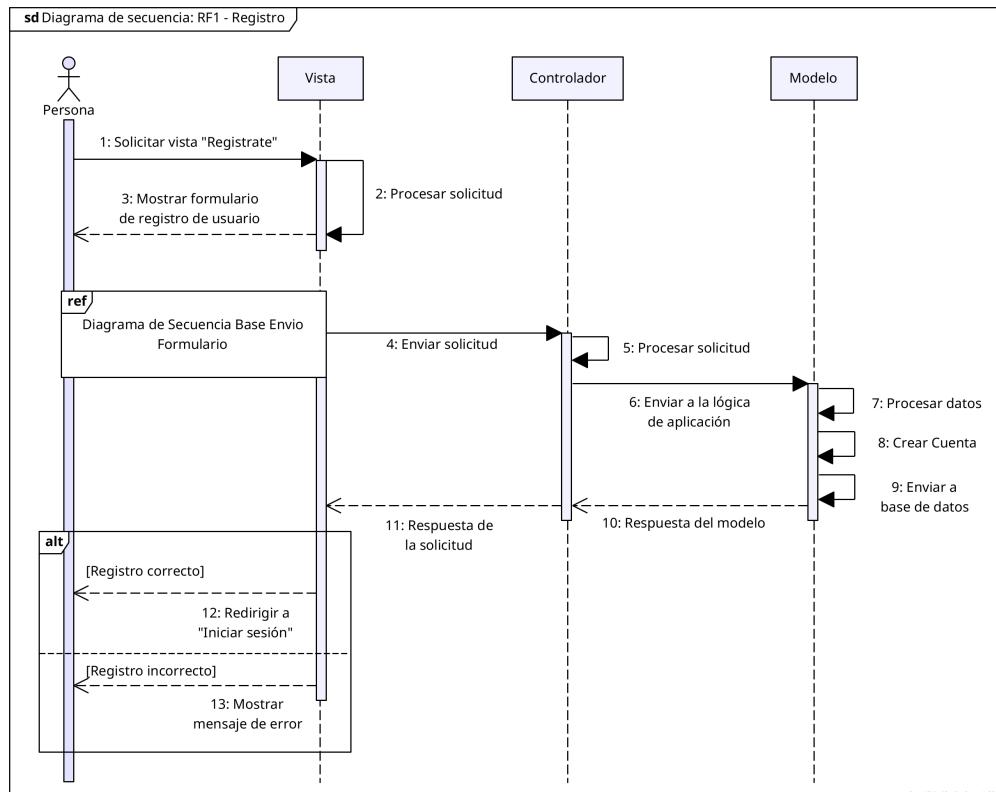
La secuencia describe el siguiente flujo general:

1. El proceso comienza cuando :Persona accede a un formulario (1: **Ingresar a un formulario**) e introduce los datos requeridos (2: **Ingresar datos del formulario**).
2. :Persona inicia la acción de envío (3: **Enviar formulario**) hacia la :Vista.
3. La :Vista realiza un procesamiento inicial (4: **Procesar solicitud**), que podría incluir validaciones del lado del cliente.
4. La :Vista solicita una confirmación explícita al usuario mostrando una ventana emergente (5: **Mostrar ventana emergente de confirmación**).
5. Se presenta un fragmento alternativo (**alt**) basado en la respuesta de :Persona:
  - **Si [Confirma acción]**: :Persona confirma el envío (6). La :Vista procede con el procesamiento definitivo de la solicitud (7), cierra la ventana emergente (8) y permite continuar la secuencia (9), lo que usualmente implica una redirección o un mensaje de éxito. (*Nota: El paso 7 es donde, en diagramas específicos, se detallaría la comunicación con controladores, servicios y base de datos*).
  - **Si [Cancela acción]**: :Persona cancela el envío (10). La :Vista procesa la cancelación (11), cierra la ventana emergente (12) y vuelve a mostrar el formulario (13), permitiendo al usuario corregir datos o abandonar la tarea.

Este diagrama establece la interacción fundamental usuario-interfaz para operaciones de formulario, haciendo énfasis en el paso de confirmación antes del procesamiento final.

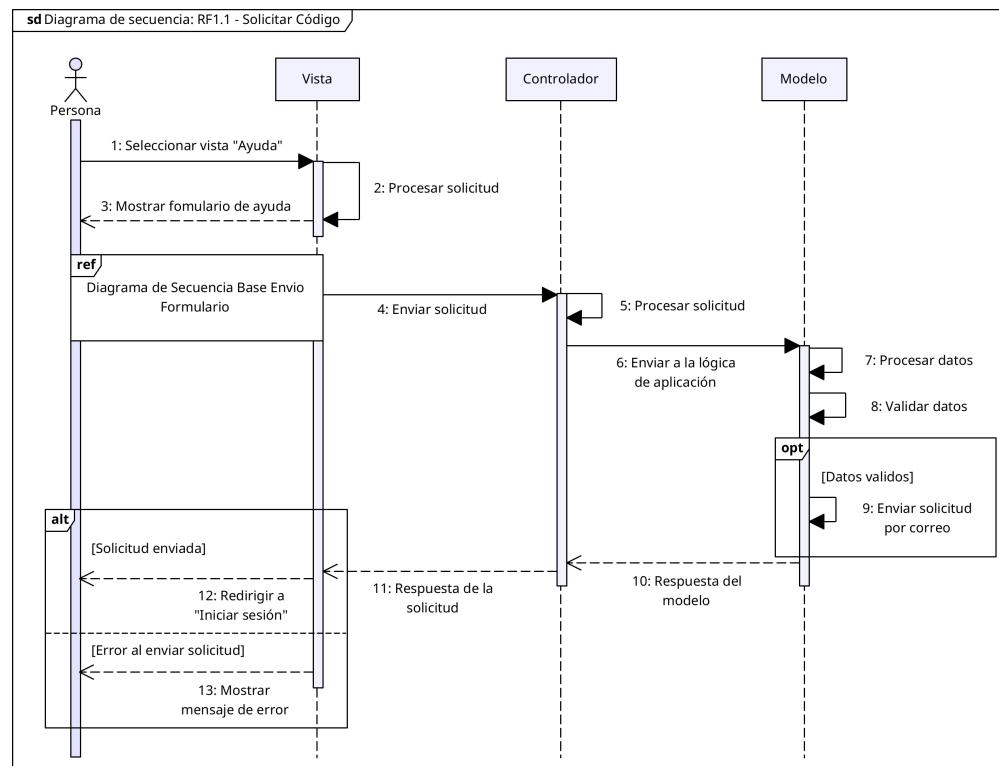
**Figura 14**

*Diagrama de Secuencia para el Registro (RF1.0).*



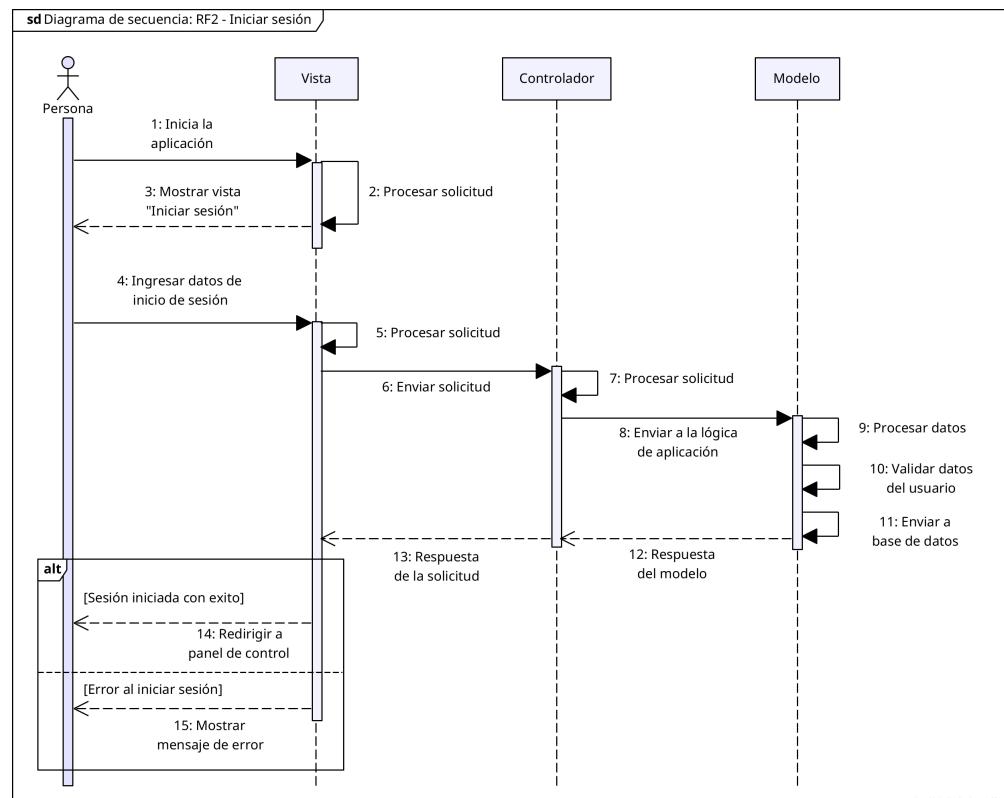
**Figura 15**

Diagrama de Secuencia para Solicitar Código (RF1.1).



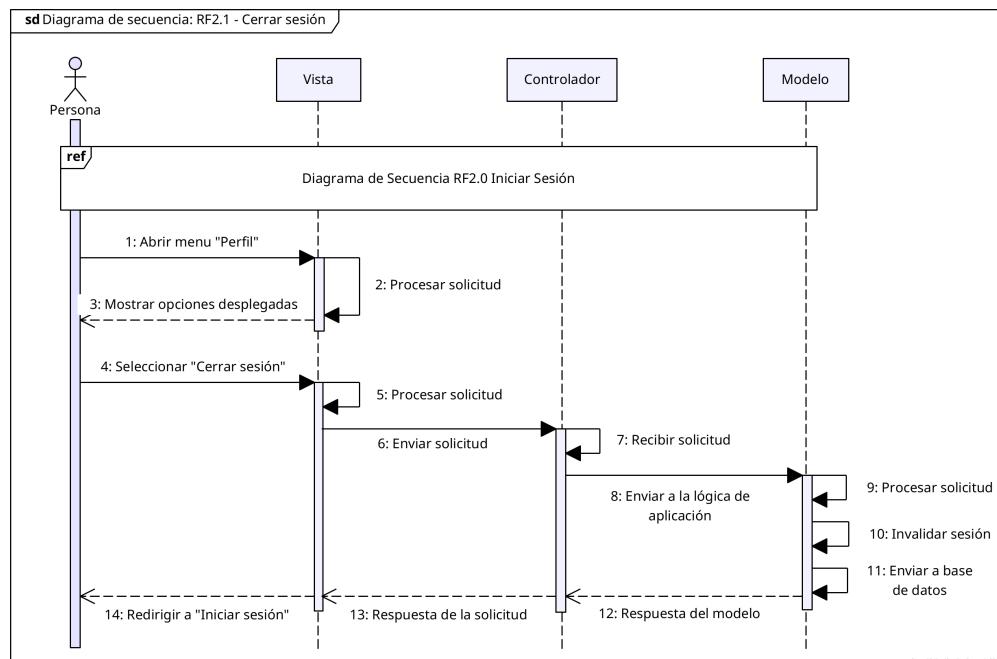
**Figura 16**

Diagrama de Secuencia para Iniciar Sesión (RF2.0).



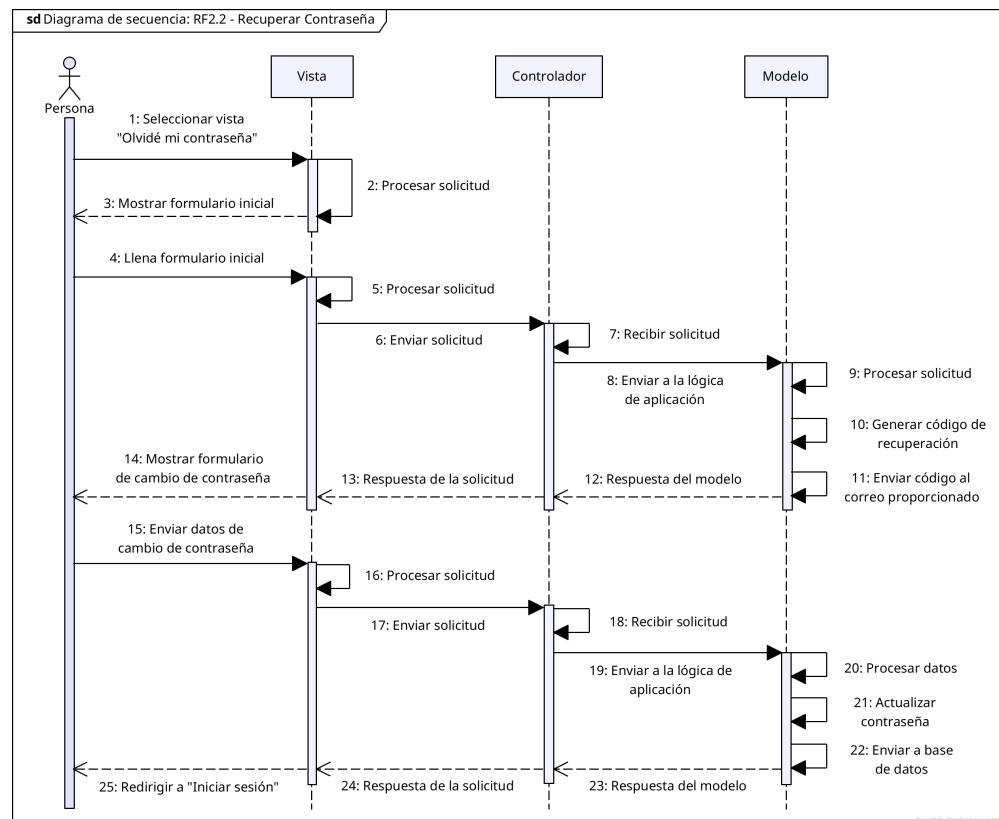
**Figura 17**

Diagrama de Secuencia para Cerrar Sesión (RF2.1).



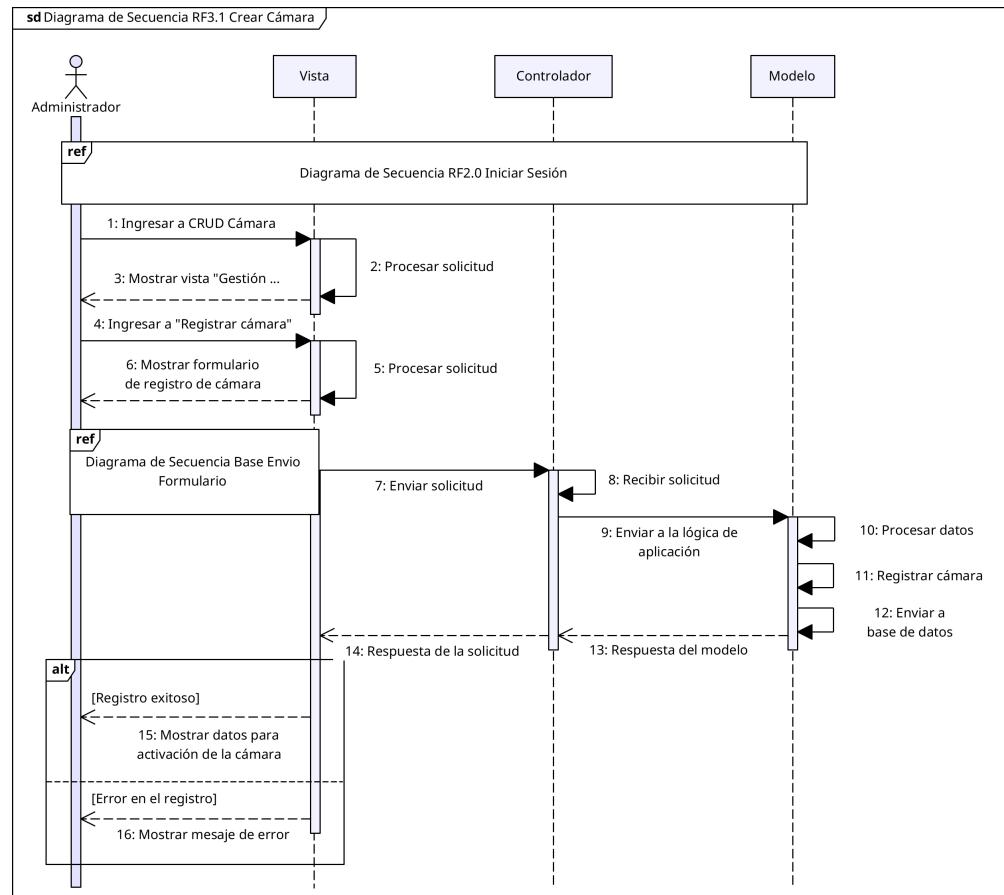
**Figura 18**

*Diagrama de Secuencia para Recuperar Contraseña (RF2.2).*



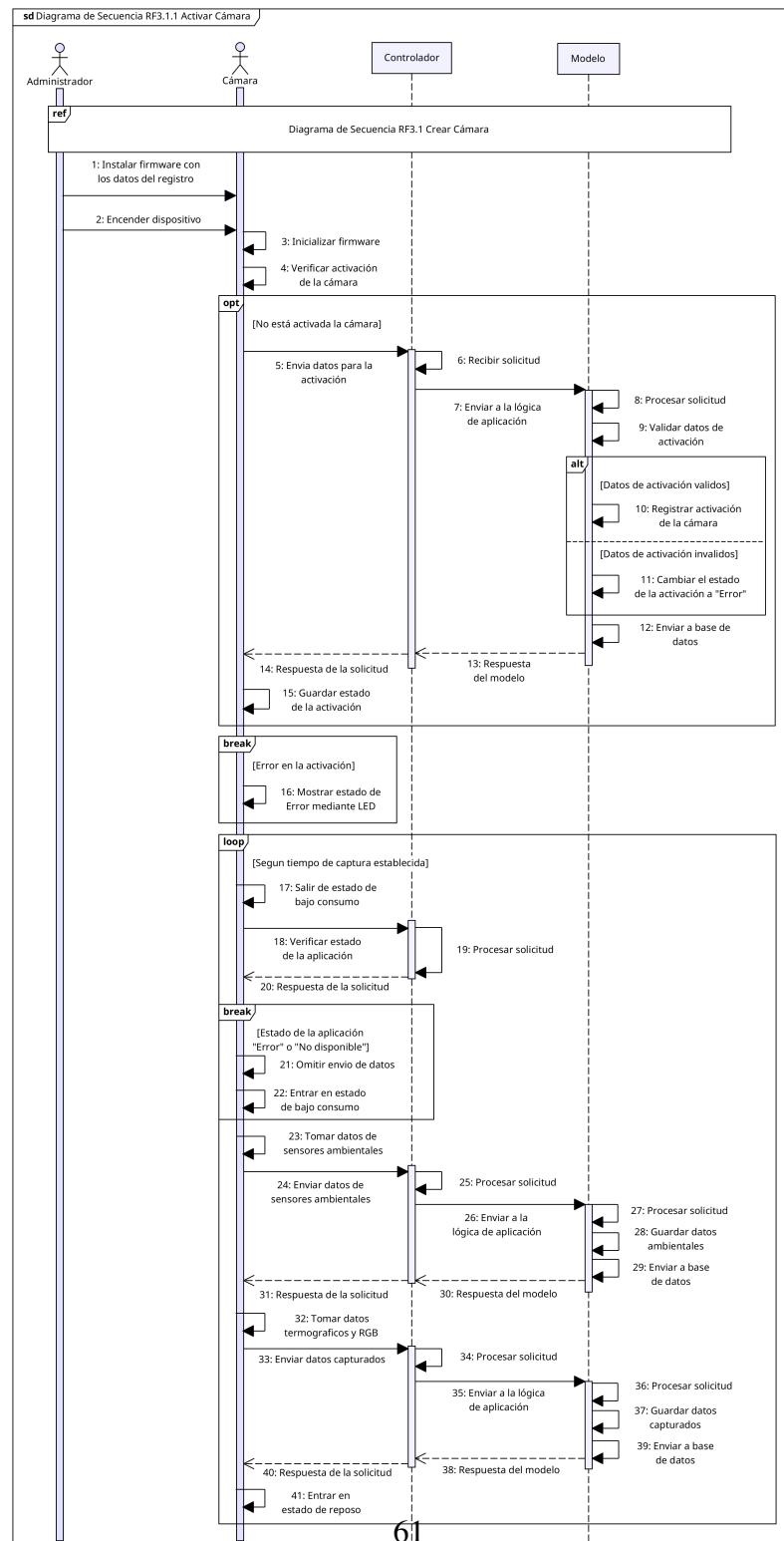
**Figura 19**

Diagrama de Secuencia para Crear Cámara (RF3.1).



**Figura 20**

Diagrama de Secuencia para Activar Cámara (RF3.1.1).



## Línea de Vida :Camara

La responsabilidad principal de la línea de vida :Camara es interactuar con la API del sistema. Encapsula la lógica autónoma del dispositivo físico, manejando su activación, configuración, el ciclo periódico de toma y envío de datos (ambientales y de imagen), y la gestión básica de errores de comunicación con la API. Su comportamiento se divide en dos fases principales:

### 1. Fase de Activación:

- Al iniciar y verificar la conexión de red, la :Camara envía un código de activación único a la API.
- Espera una respuesta de la API. Si la activación es exitosa, recibe la configuración operativa (ej. intervalo de muestreo) que fue definida por el Administrador durante el registro del dispositivo en el sistema.
- Almacena esta configuración recibida de forma persistente (memoria no volátil) para guiar su funcionamiento futuro.
- Si el proceso de activación falla (ej. código inválido, API no responde correctamente), la :Camara entra en un estado de error y detiene el proceso, sin pasar a la fase operativa.

### 2. Fase Operativa (Ciclo de Trabajo):

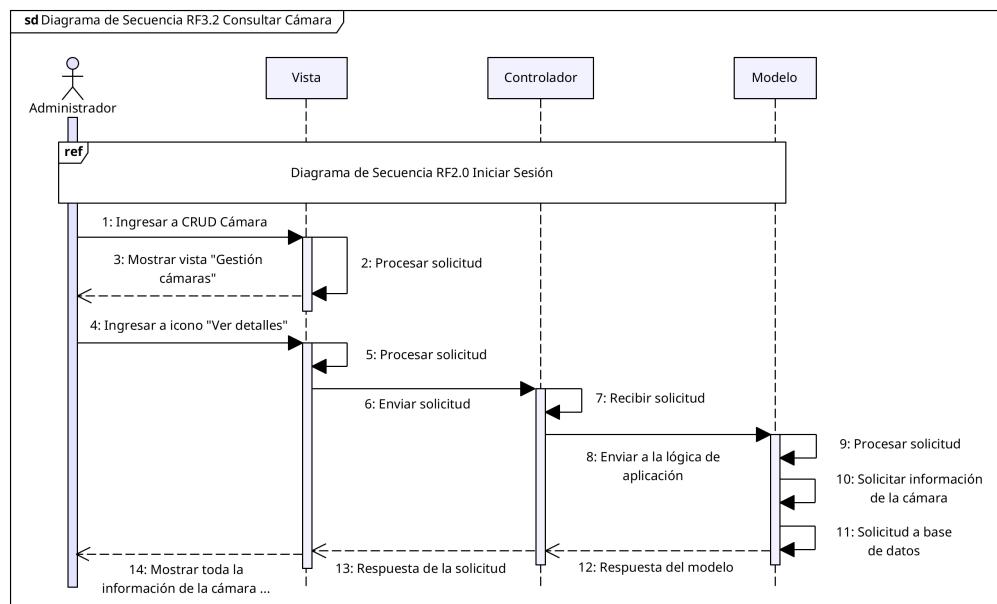
- Una vez activada, la :Camara opera en un ciclo continuo basado en el intervalo de tiempo definido en su configuración almacenada.
- Al inicio de cada ciclo, verifica la disponibilidad de la API.
- **Si la API está disponible:** Procede a recolectar los datos de los sensores ambientales (temperatura, humedad, etc.) y los envía a la API. Seguidamente, captura las imágenes (termográfica

y RGB) y las envía también a la API. Después de enviar los datos, entra en un modo de bajo consumo o reposo hasta que el temporizador del ciclo indique el inicio del siguiente.

- **Si la API no está disponible:** La :Camara omite la recolección y envío de datos para ese ciclo. Entra en un periodo de espera antes de volver a intentar la verificación de la API en el siguiente ciclo programado.

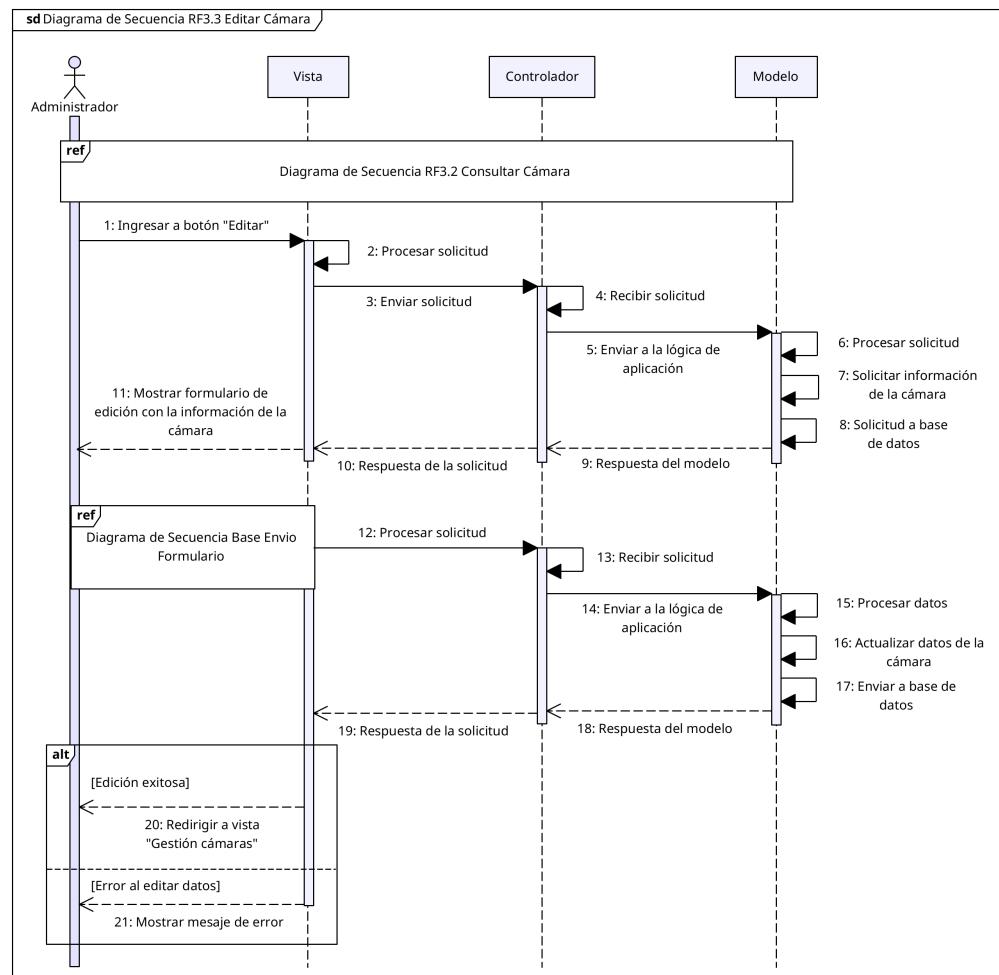
**Figura 21**

*Diagrama de Secuencia para Consultar Cámara (RF3.2).*



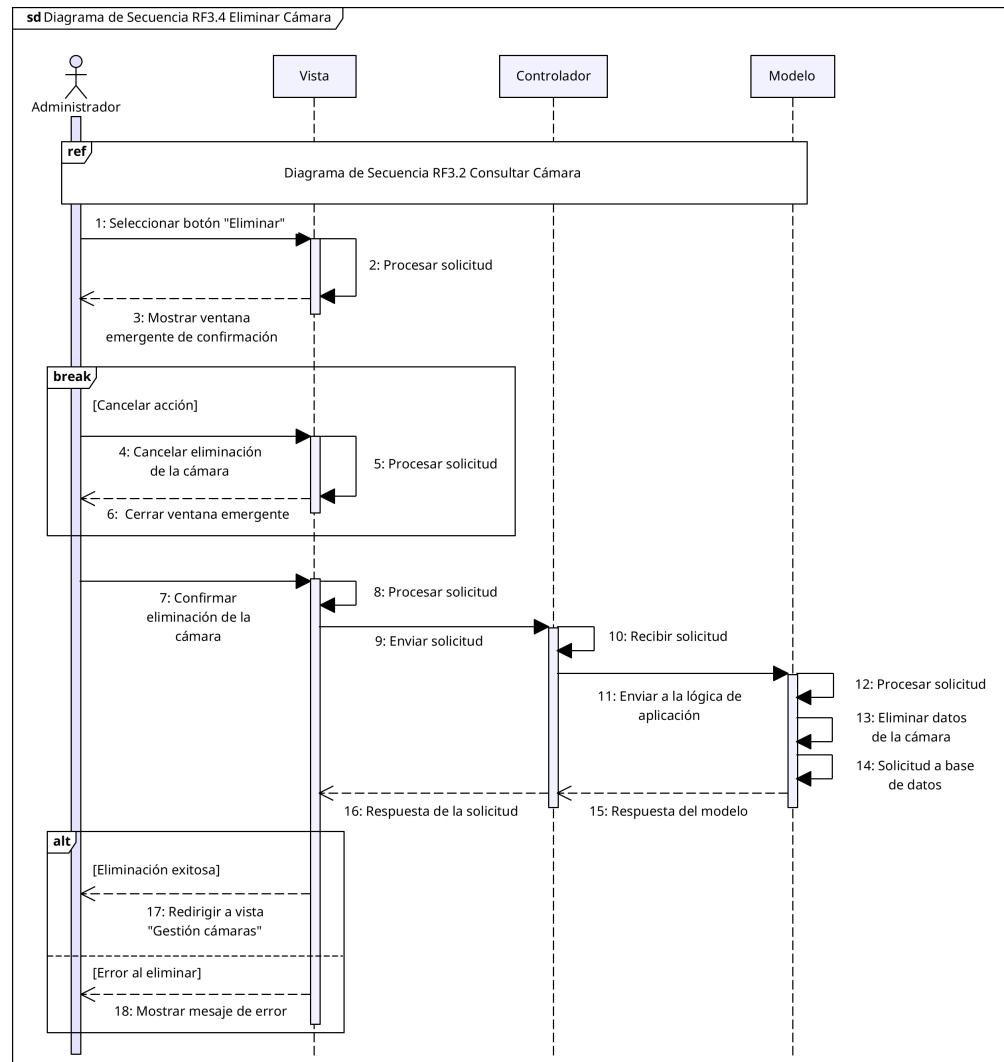
**Figura 22**

Diagrama de Secuencia para Editar Cámara (RF3.3).



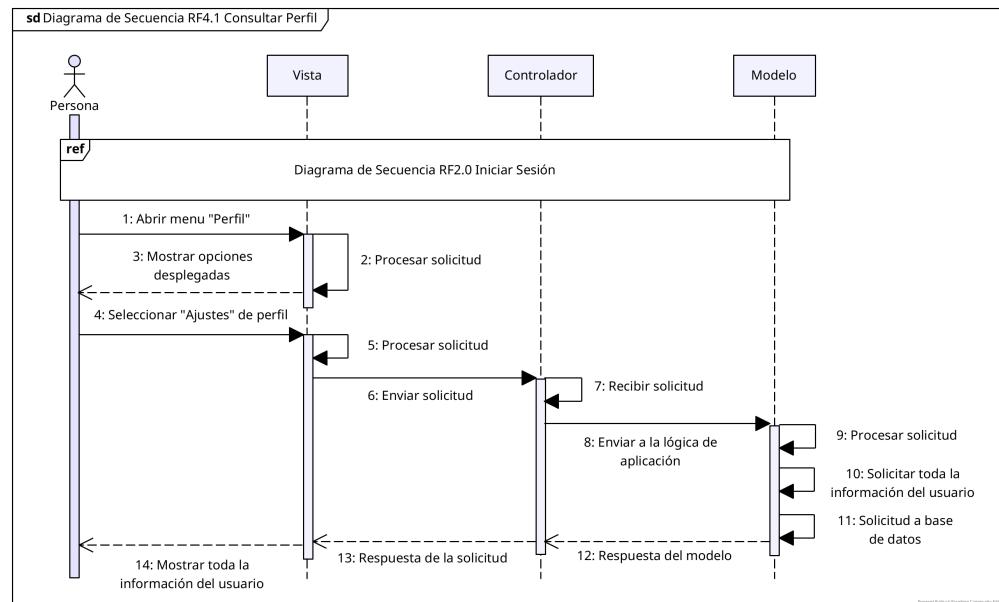
**Figura 23**

Diagrama de Secuencia para Eliminar Cámara (RF3.4).



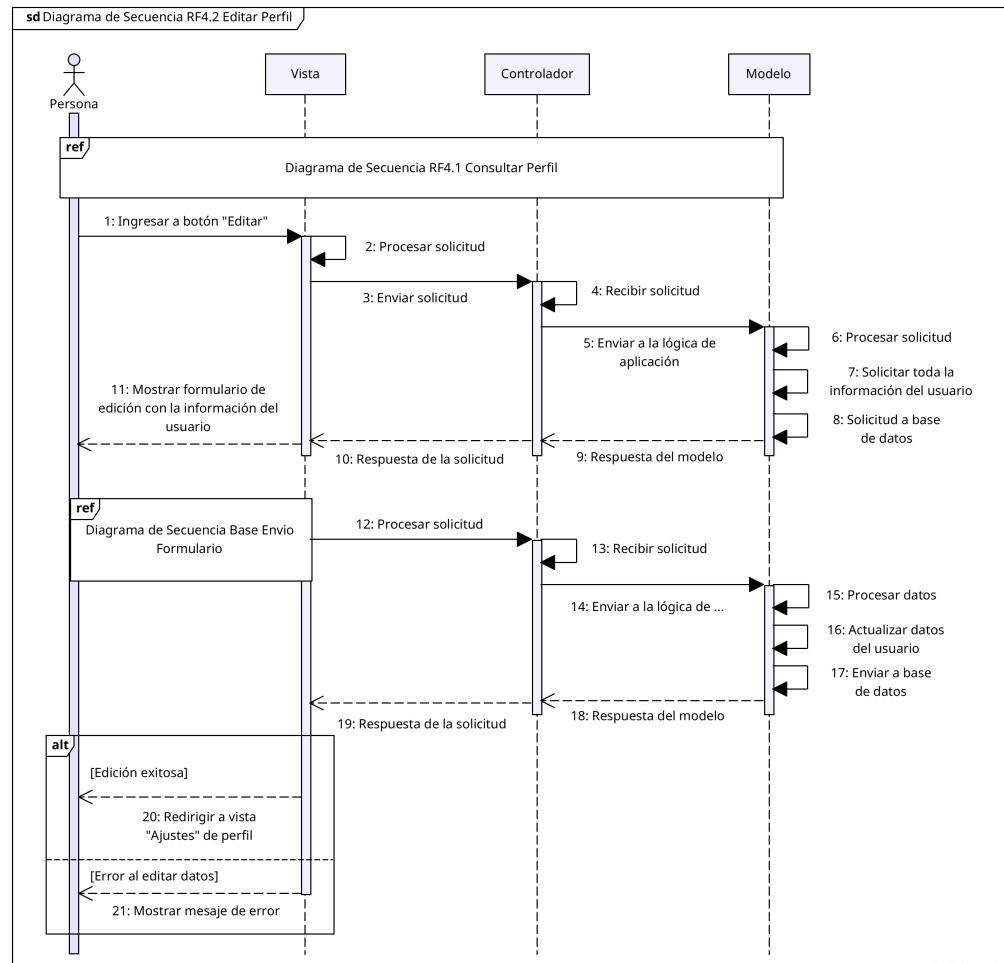
**Figura 24**

*Diagrama de Secuencia para Consultar Perfil (RF4.1).*



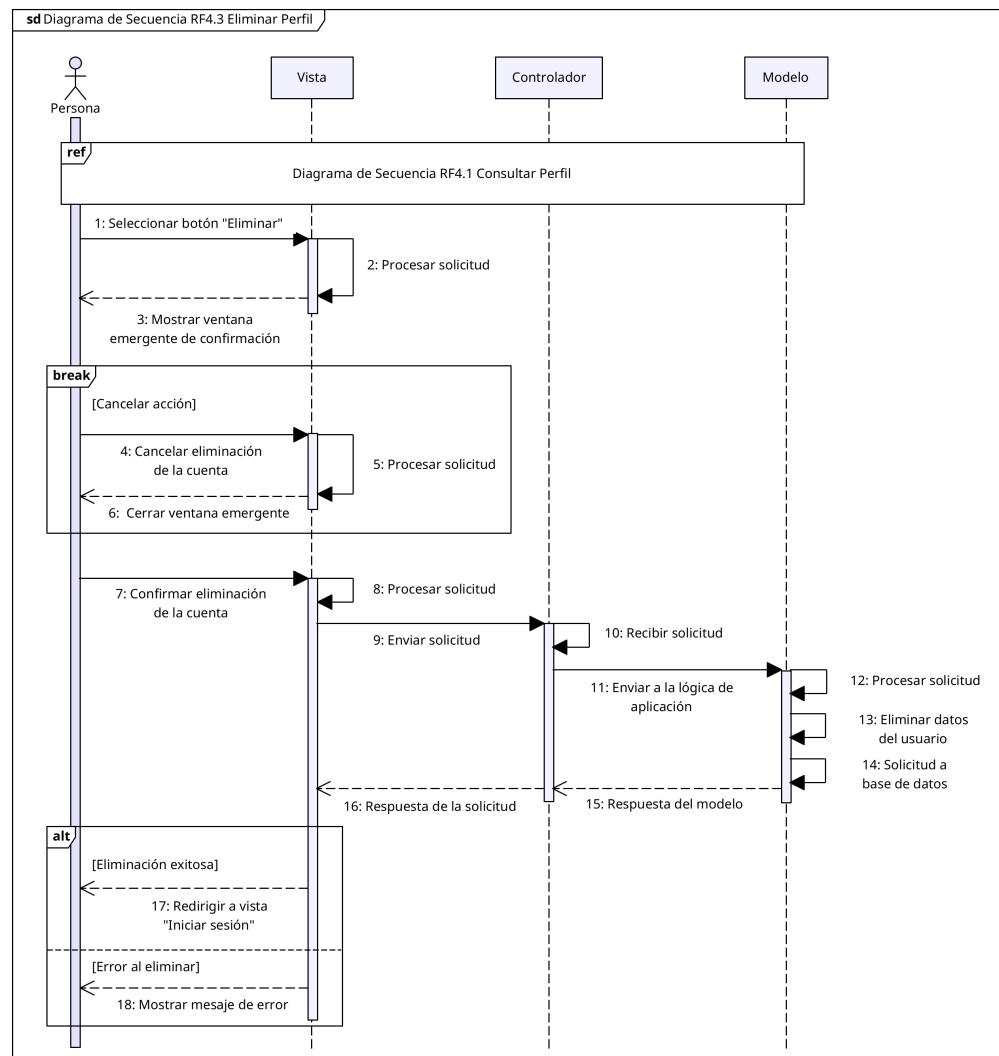
**Figura 25**

Diagrama de Secuencia para Editar Perfil (RF4.2).



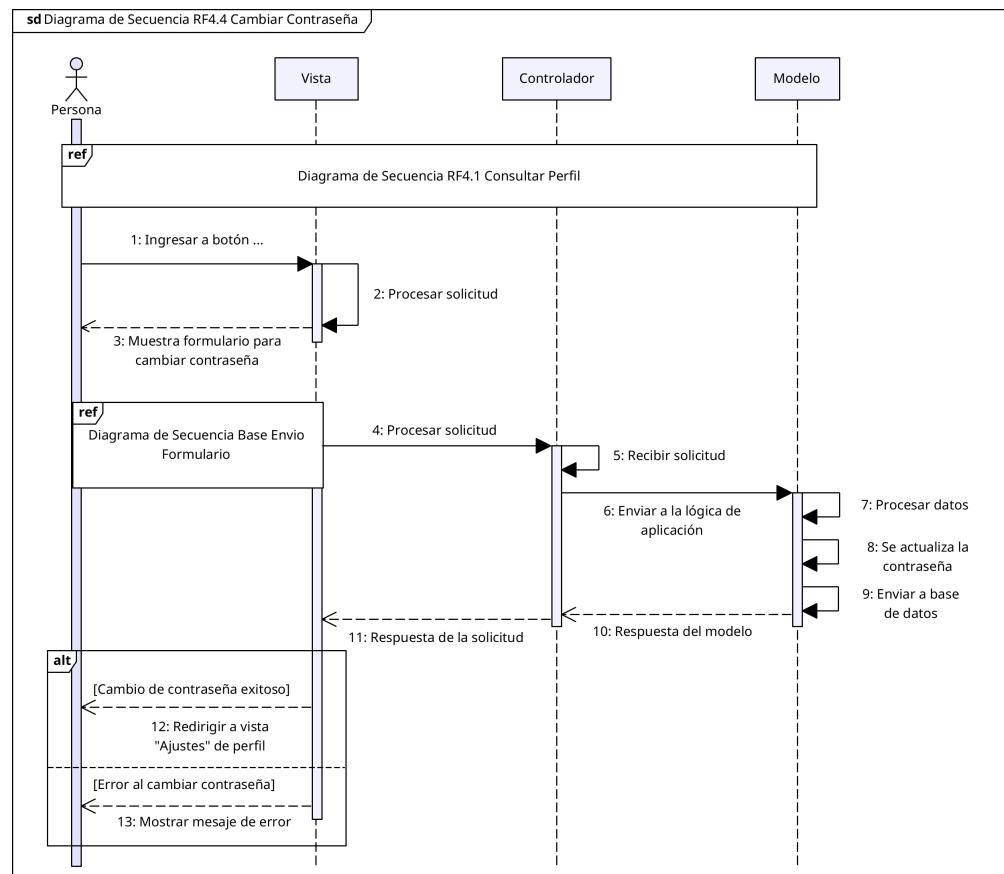
**Figura 26**

Diagrama de Secuencia para Eliminar Perfil (RF4.3).



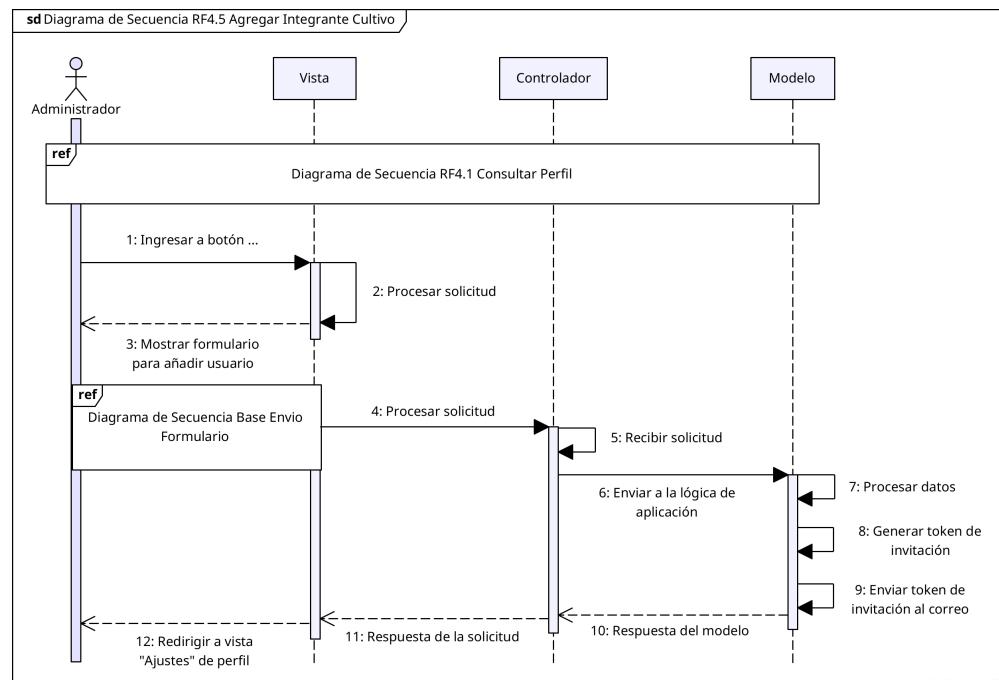
**Figura 27**

*Diagrama de Secuencia para Cambiar Contraseña (RF4.4).*



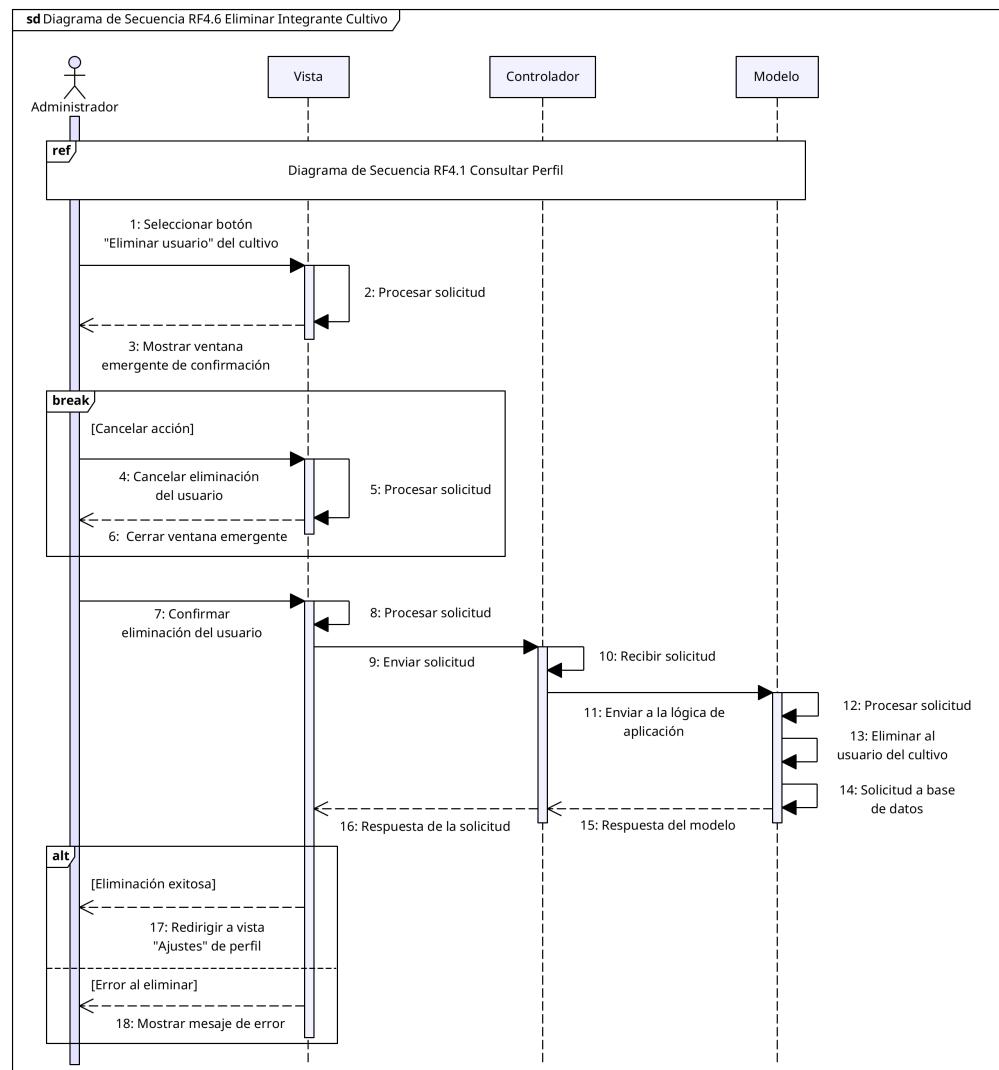
**Figura 28**

Diagrama de Secuencia para Agregar Integrante de Cultivo (RF4.5).



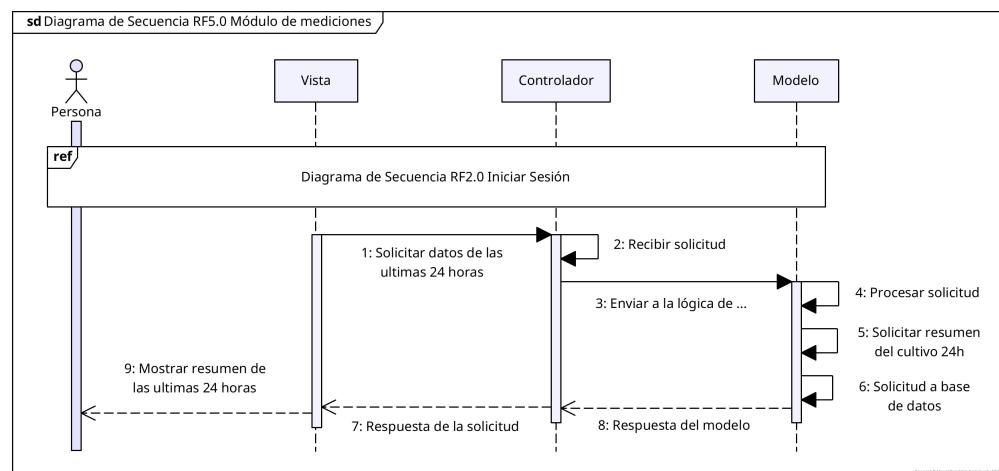
**Figura 29**

Diagrama de Secuencia para Eliminar Integrante de Cultivo (RF4.6).



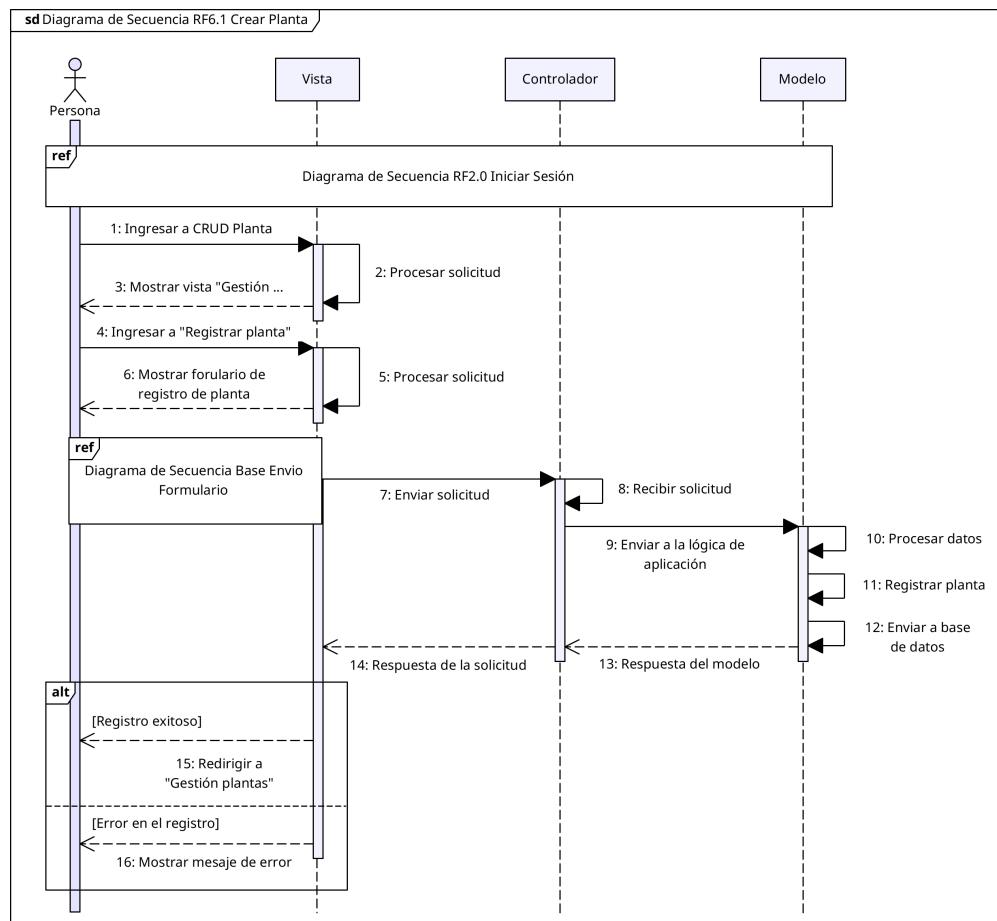
**Figura 30**

*Diagrama de Secuencia para el Módulo de Mediciones (RF5.0).*



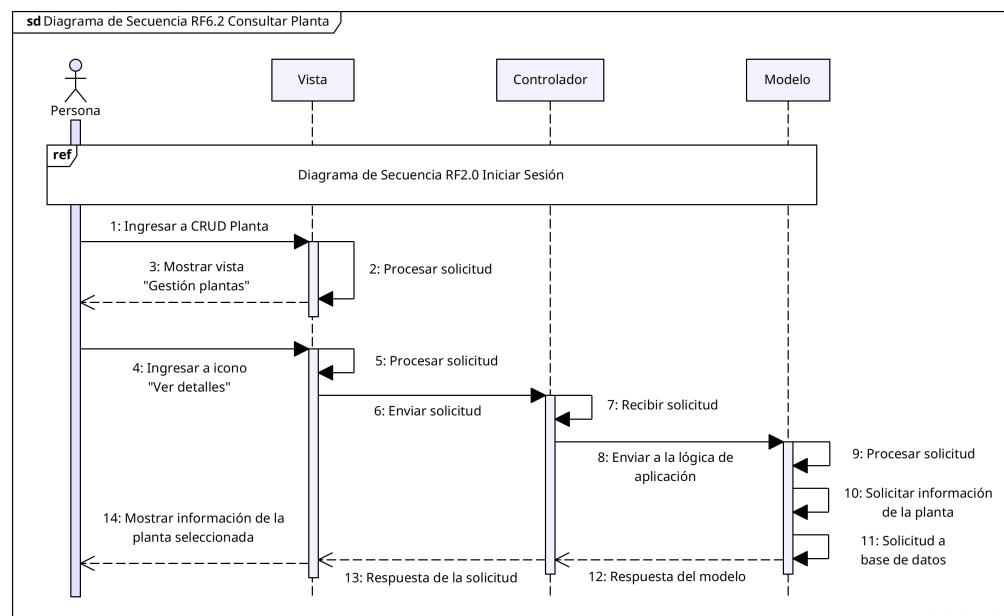
**Figura 31**

*Diagrama de Secuencia para Crear Planta (RF6.1).*



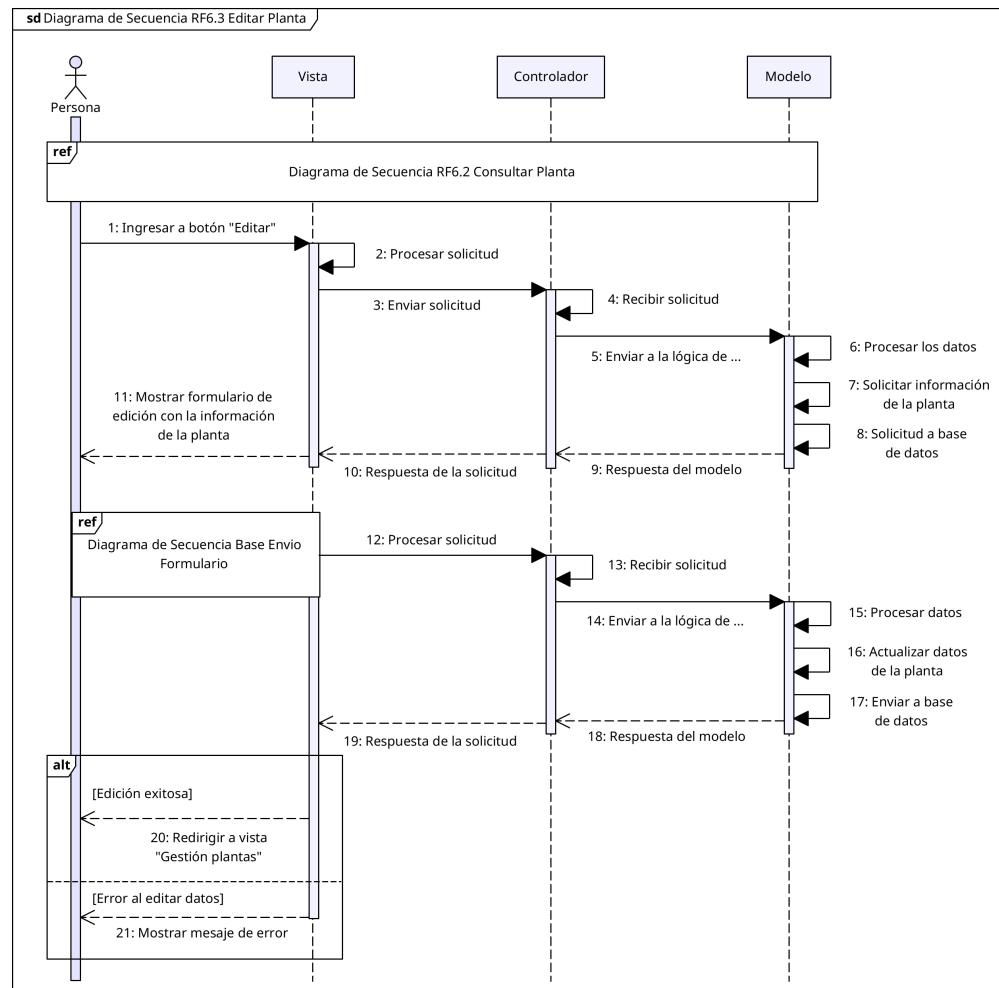
**Figura 32**

*Diagrama de Secuencia para Consultar Planta (RF6.2).*



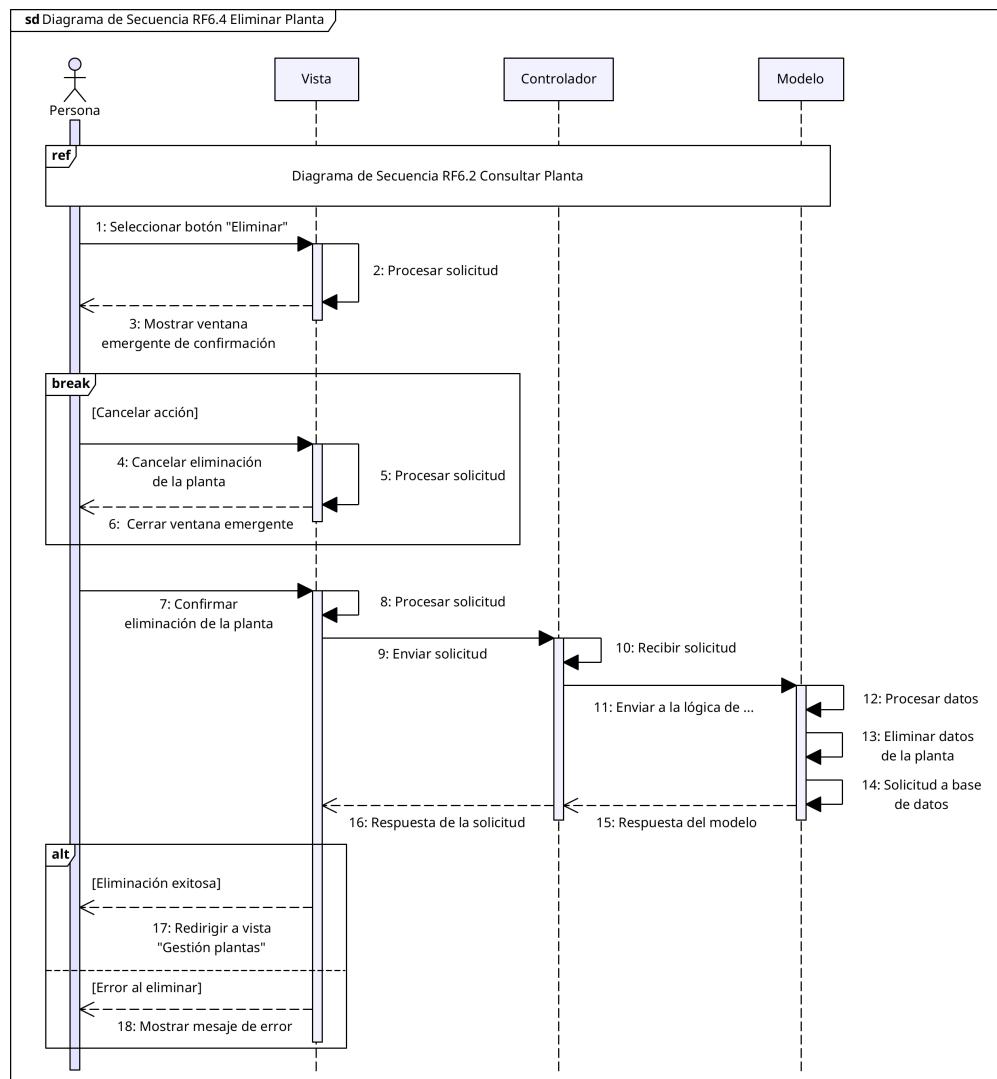
**Figura 33**

Diagrama de Secuencia para Editar Planta (RF6.3).



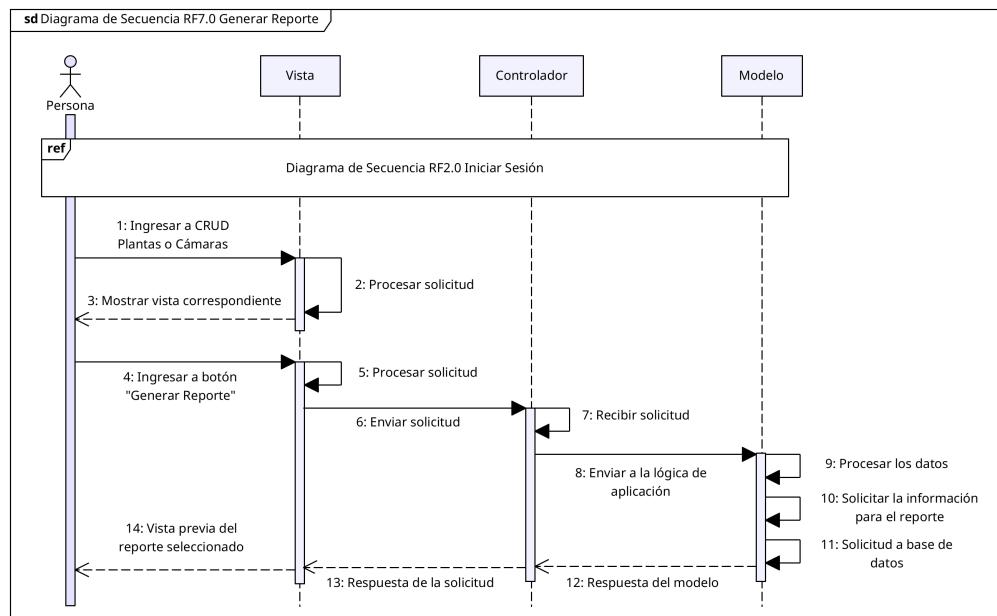
**Figura 34**

*Diagrama de Secuencia para Eliminar Planta (RF6.4).*



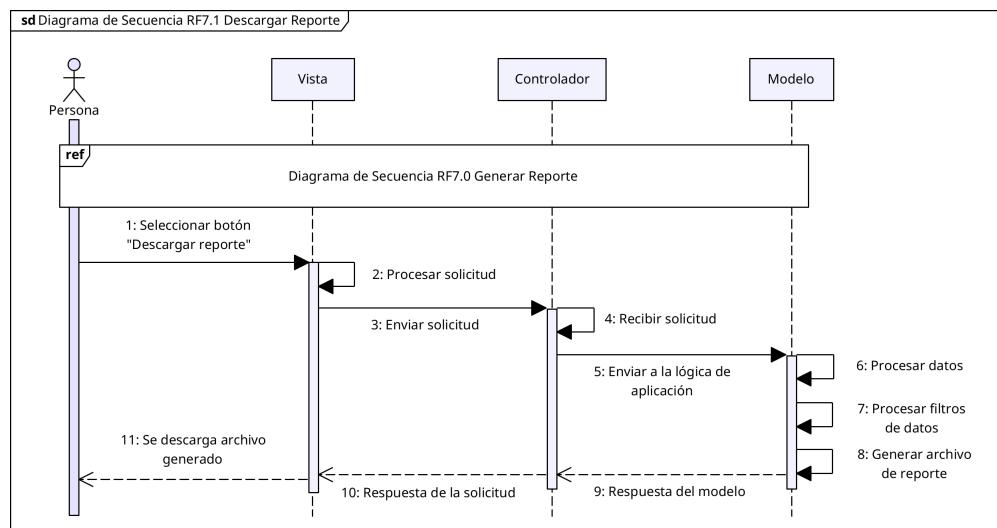
**Figura 35**

Diagrama de Secuencia para Generar Reporte (RF7.0).



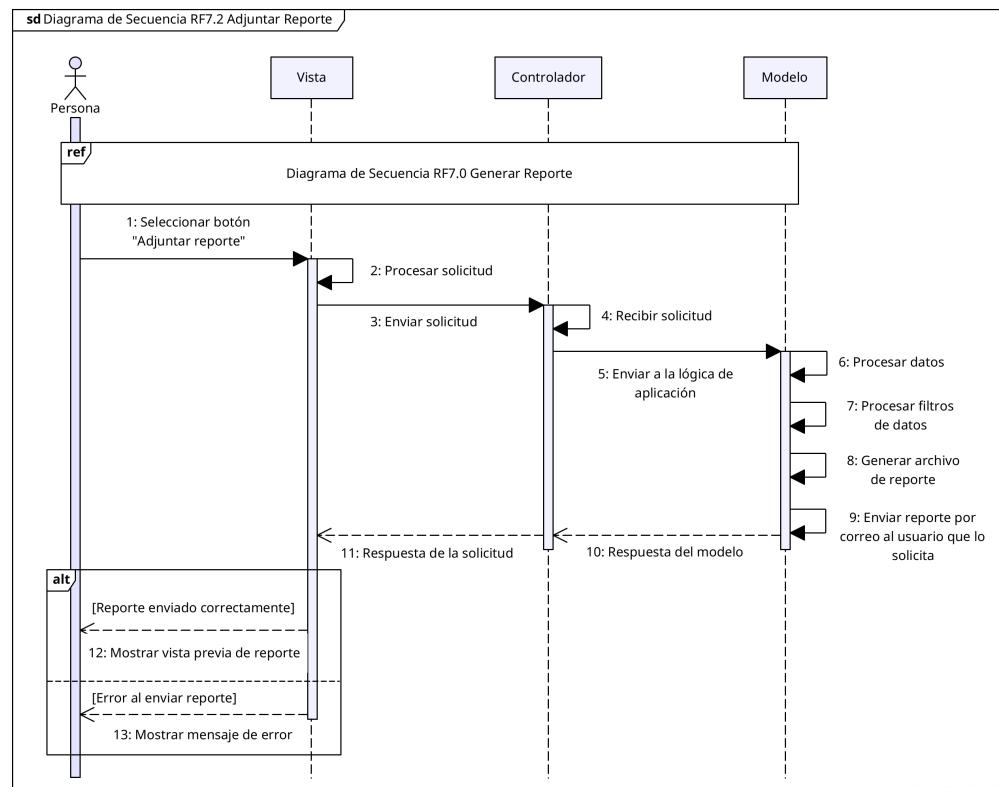
**Figura 36**

Diagrama de Secuencia para Descargar Reporte (RF7.1).



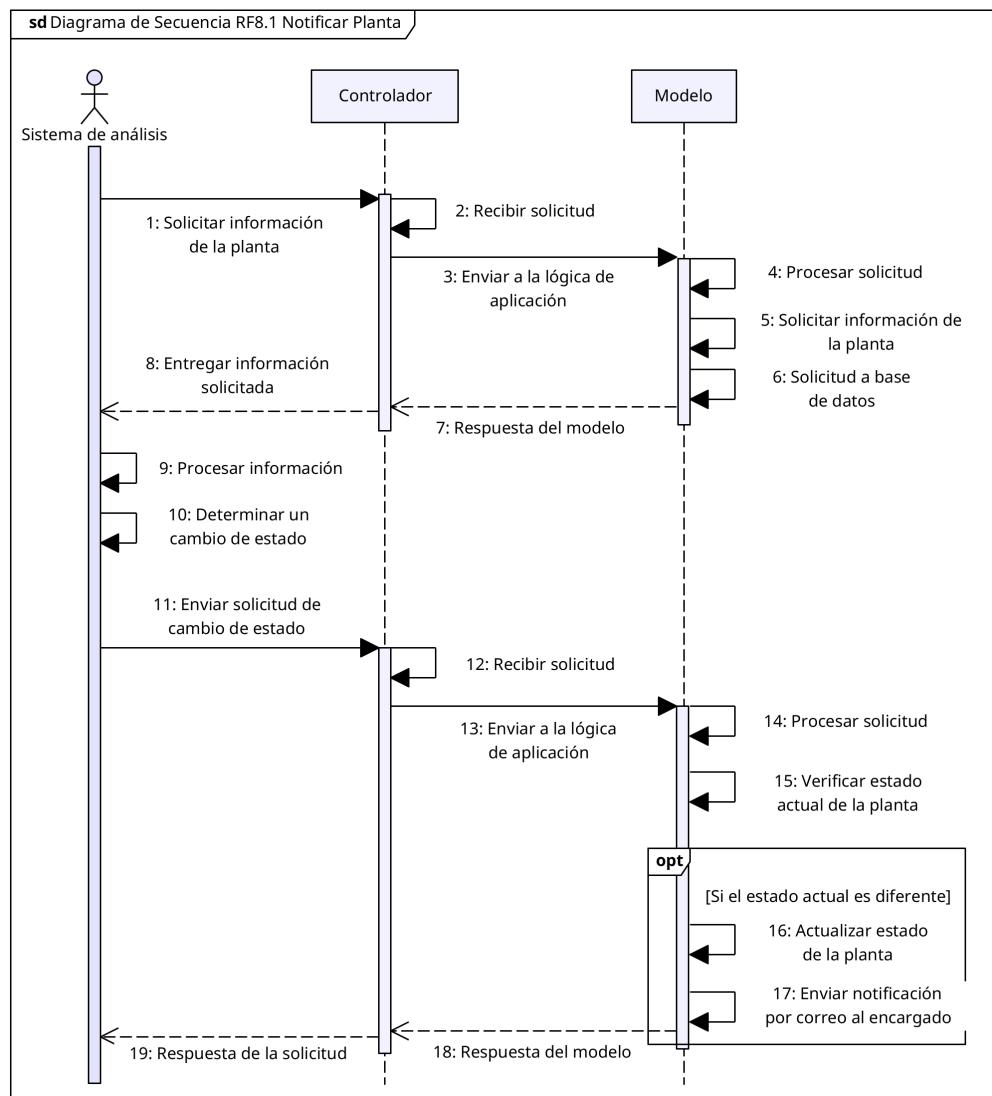
**Figura 37**

Diagrama de Secuencia para Adjuntar Reporte (RF7.2).



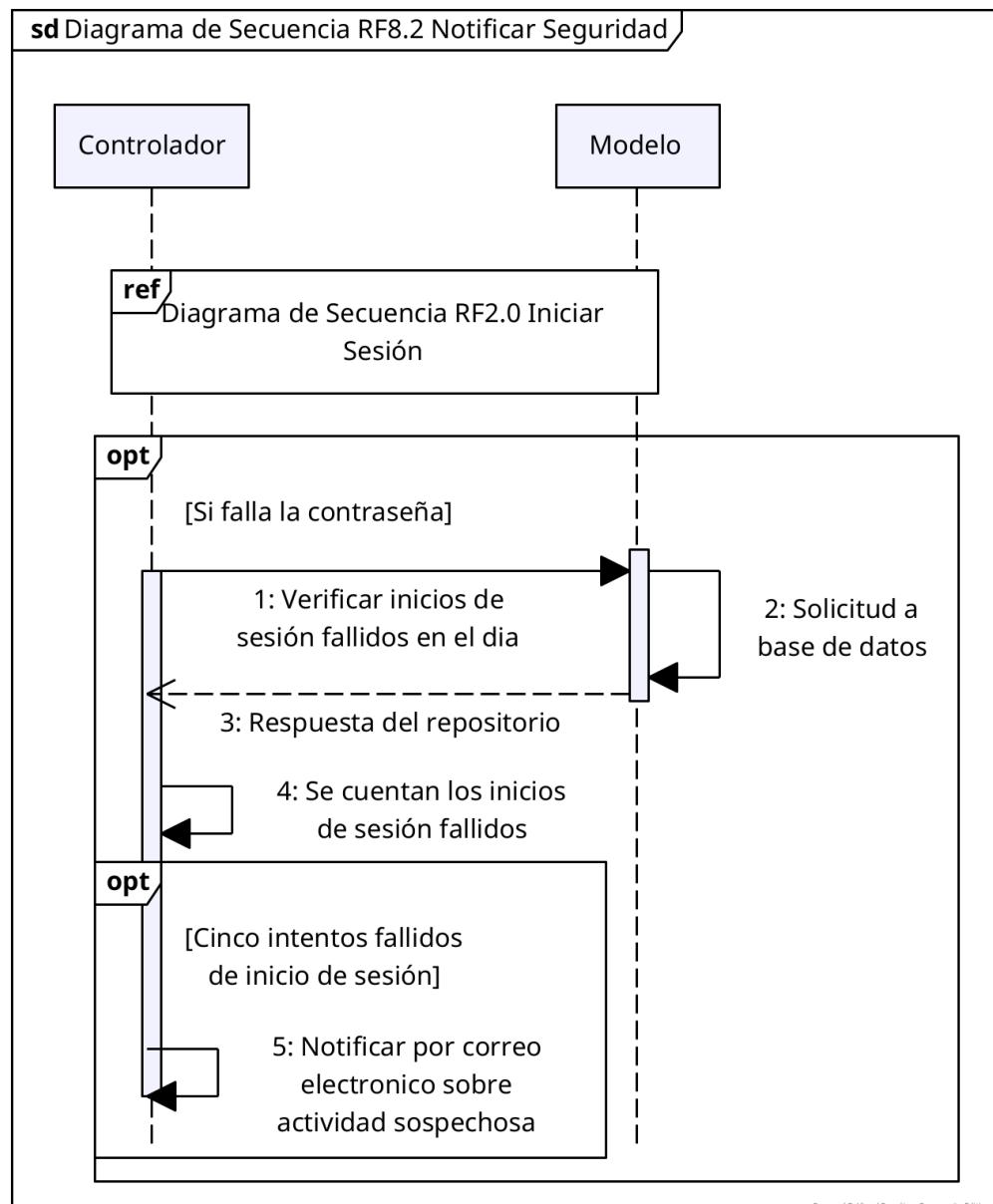
**Figura 38**

Diagrama de Secuencia para Notificar Planta (RF8.1).



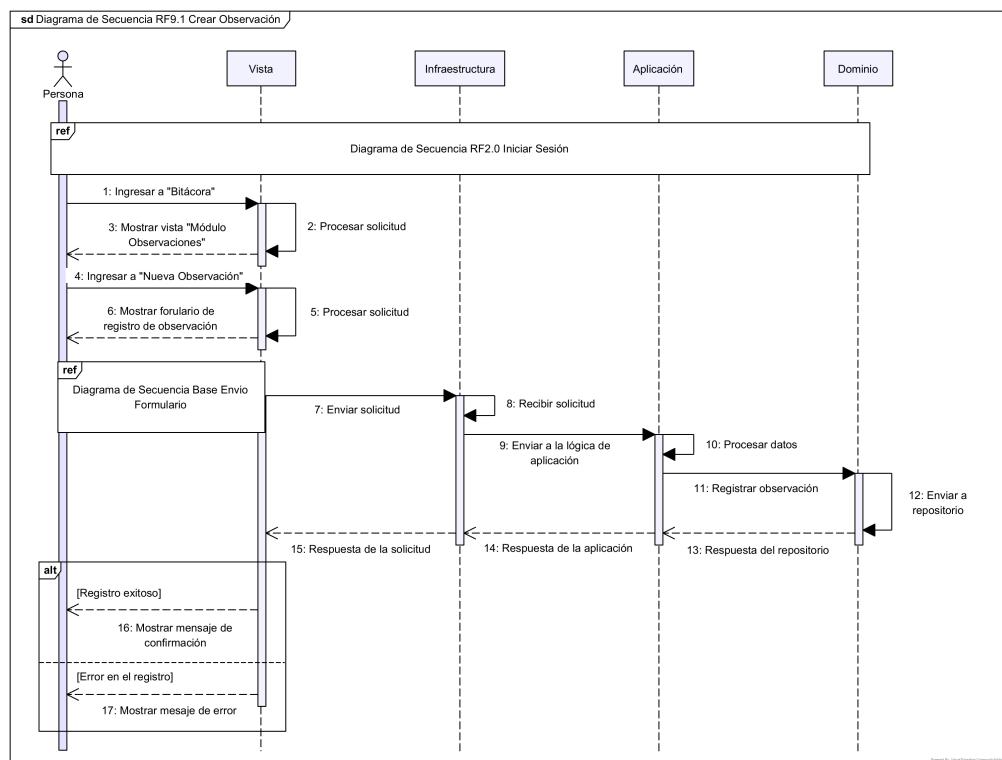
**Figura 39**

Diagrama de Secuencia para Notificar Seguridad (RF8.2).



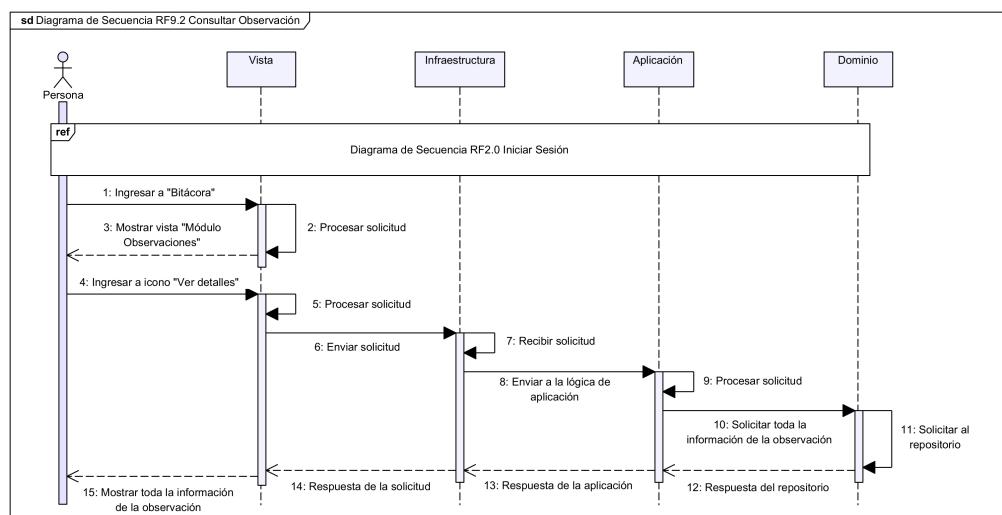
**Figura 40**

Diagrama de Secuencia para Crear Observación (RF9.1).



**Figura 41**

Diagrama de Secuencia para Consultar Observación (RF9.1).



#### **2.4.4. Diagramas de Actividades**

Una actividad muestra el flujo de control entre las actividades computacionales involucradas en la realización de un cálculo o un flujo de trabajo (Rumbaugh y cols., 2007). Una acción es un paso computacional primitivo y un nodo de actividad es un grupo de acciones o subactividades (Rumbaugh y cols., 2007). Una actividad describe tanto el cómputo secuencial como el concurrente (Rumbaugh y cols., 2007).

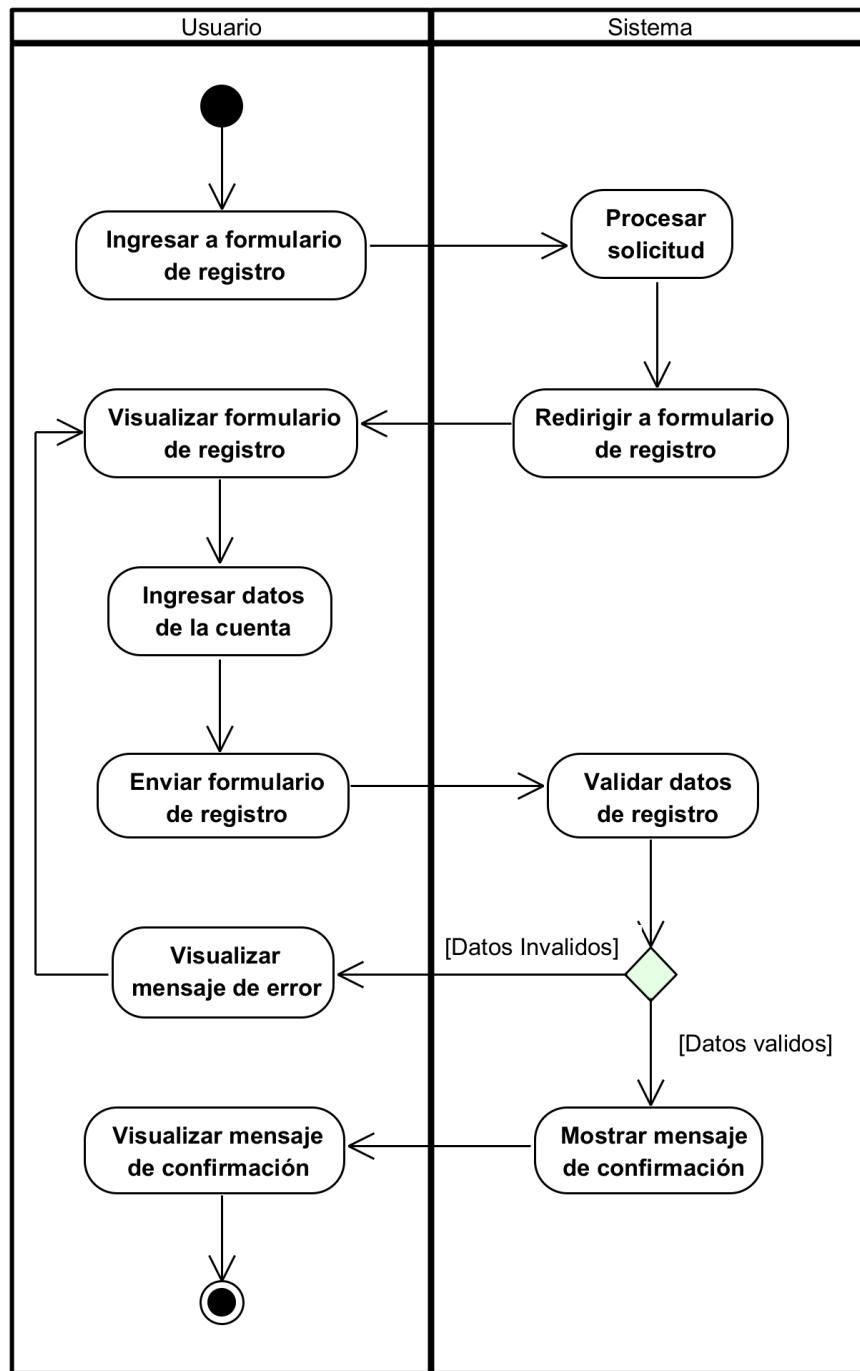
Los diagramas de actividad presentados a continuación modelan los flujos de trabajo (*workflows*) asociados a procesos o funcionalidades clave del sistema. Estos diagramas utilizan particiones verticales, comúnmente conocidas como calles o *swimlanes*, para asignar claramente la responsabilidad de cada acción a un participante específico del proceso. En la mayoría de los diagramas de este documento, se utilizan dos calles principales:

- **Usuario:** Esta calle agrupa todas aquellas actividades que son ejecutadas directamente por la persona que interactúa con la interfaz gráfica del sistema. Representa las acciones del usuario final, ya sea que actúe con el rol de **Usuario** o de **Administrador**. Ejemplos típicos de actividades en esta calle incluyen: ingresar datos en un formulario, seleccionar opciones, iniciar una acción (como presionar un botón) y visualizar mensajes o resultados mostrados por la aplicación.
- **Sistema:** Esta calle engloba todas las actividades y procesos que son realizados internamente por la aplicación software (backend y/o frontend). Representa las operaciones automáticas del sistema, tales como: procesar la información enviada por el usuario, validar datos según reglas de negocio, ejecutar algoritmos, consultar o actualizar información en la base de datos, determinar estados, generar respuestas y preparar la información que se devolverá a la interfaz para ser visualizada por el usuario.

La separación de actividades entre estas dos calles principales (*Usuario* y *Sistema*) permite visualizar de manera clara la interacción entre el usuario humano y la lógica interna de la aplicación a lo largo de un flujo de trabajo específico. Otros diagramas podrían incluir calles adicionales si participan otros actores o sistemas externos específicos en un proceso particular.

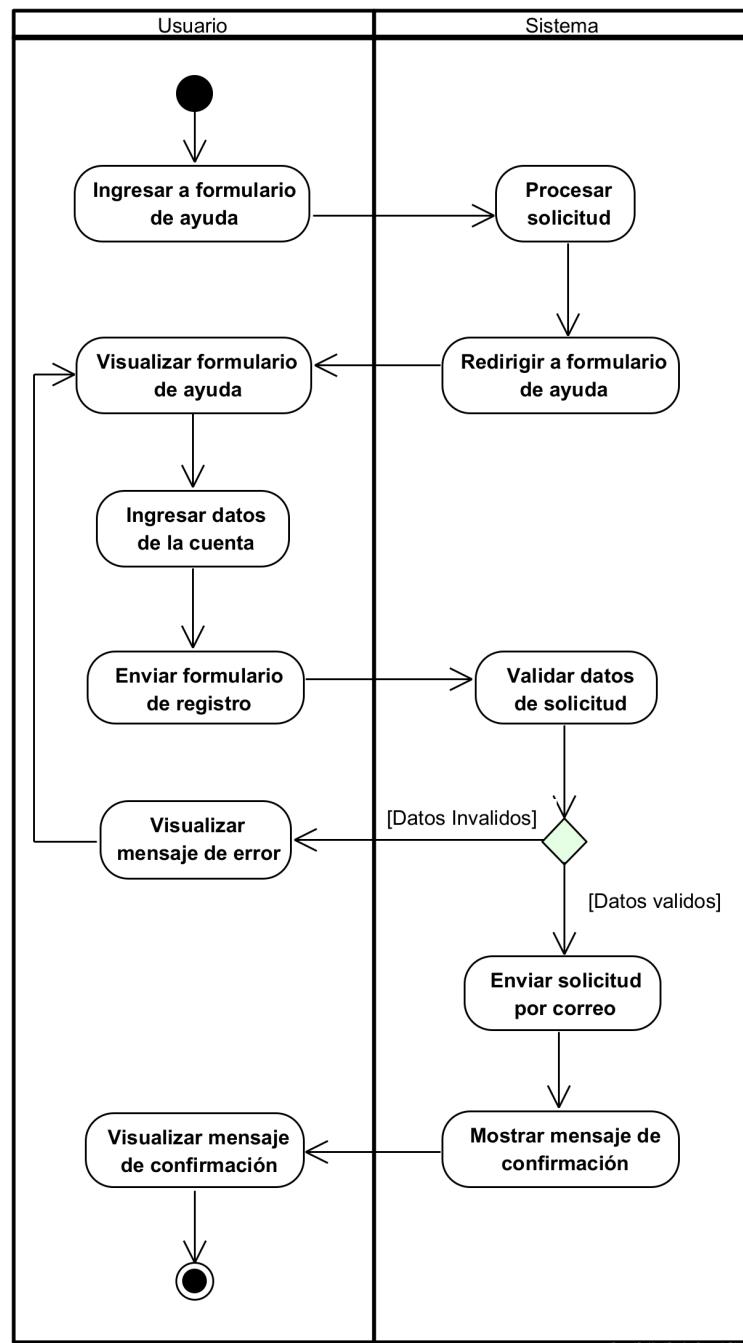
**Figura 42**

Diagrama de Actividad para el Registro (RF1.0).



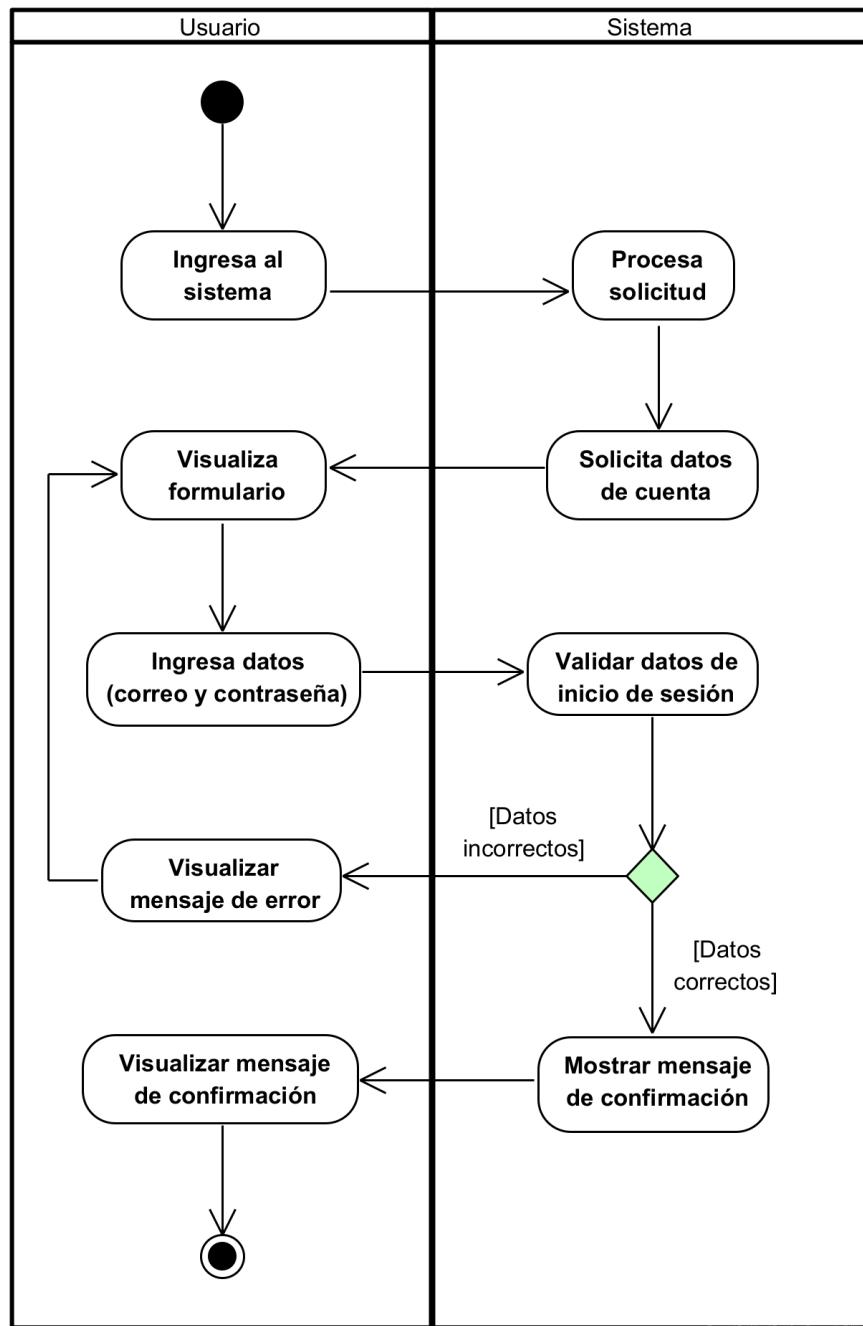
**Figura 43**

Diagrama de Actividad para Solicitar Código (RF1.1).



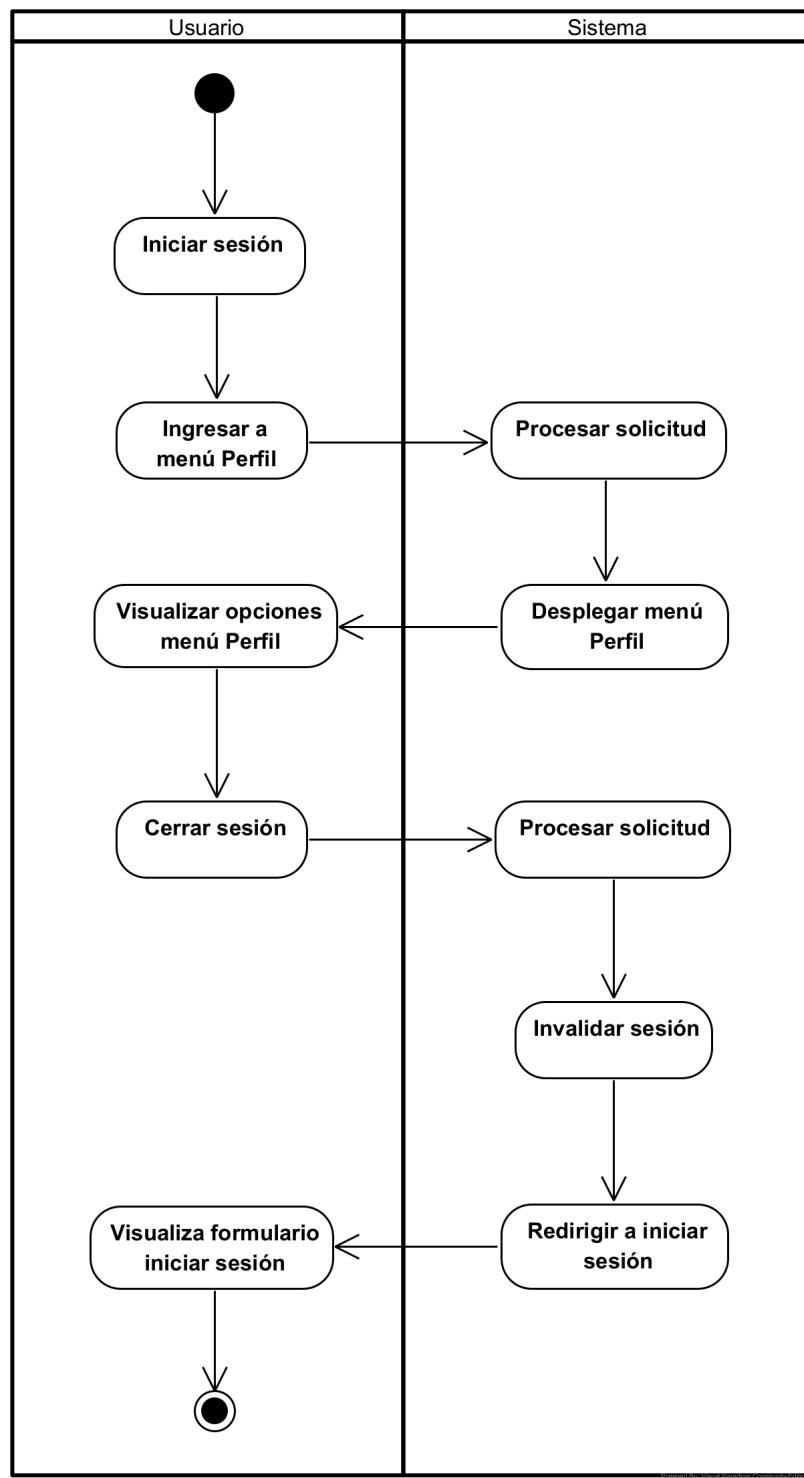
**Figura 44**

Diagrama de Actividad para Iniciar Sesión (RF2.0).



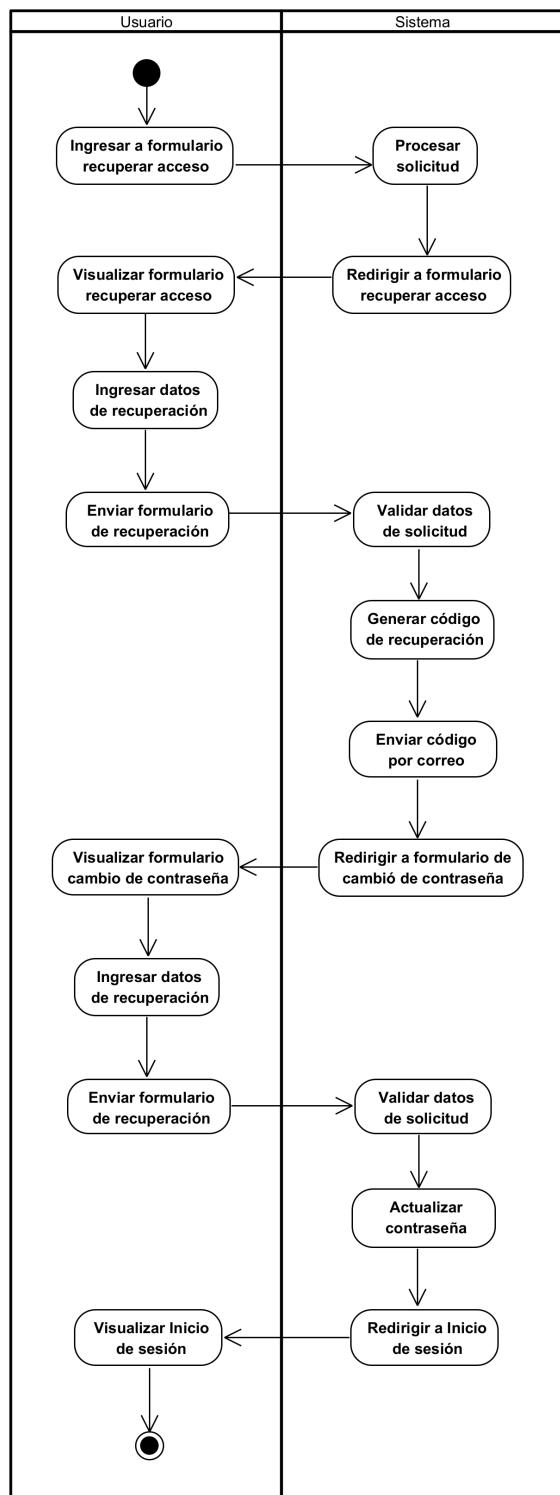
**Figura 45**

Diagrama de Actividad para Cerrar Sesión (RF2.1).



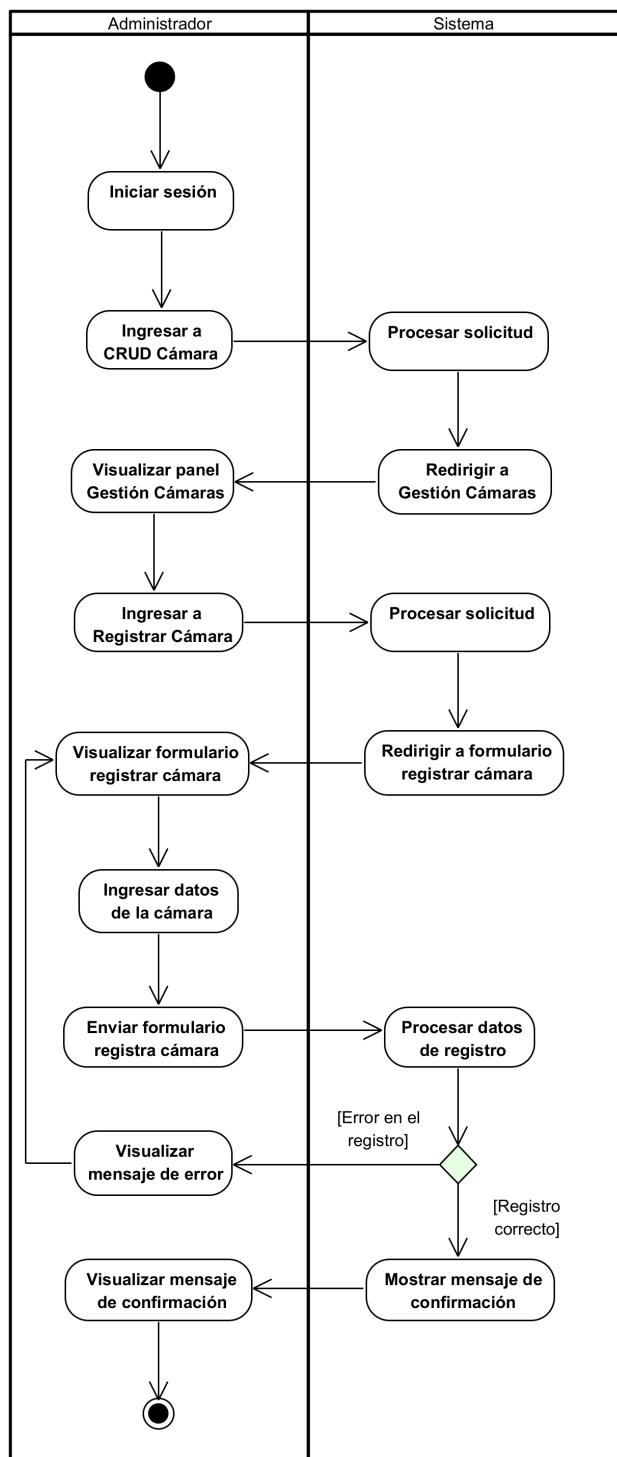
**Figura 46**

*Diagrama de Actividad para Recuperar Contraseña (RF2.2).*



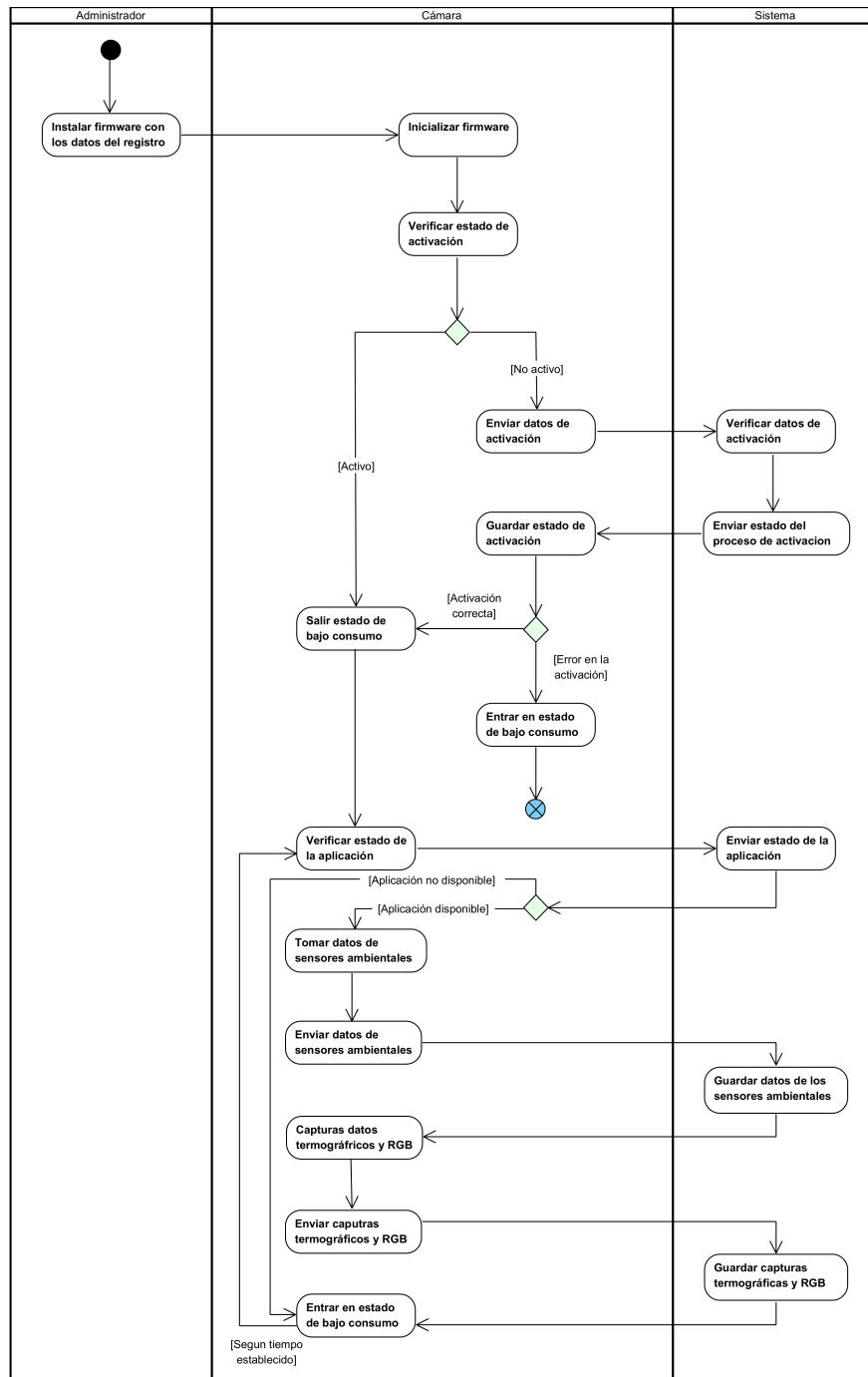
**Figura 47**

Diagrama de Actividad para Crear Cámara (RF3.1).



**Figura 48**

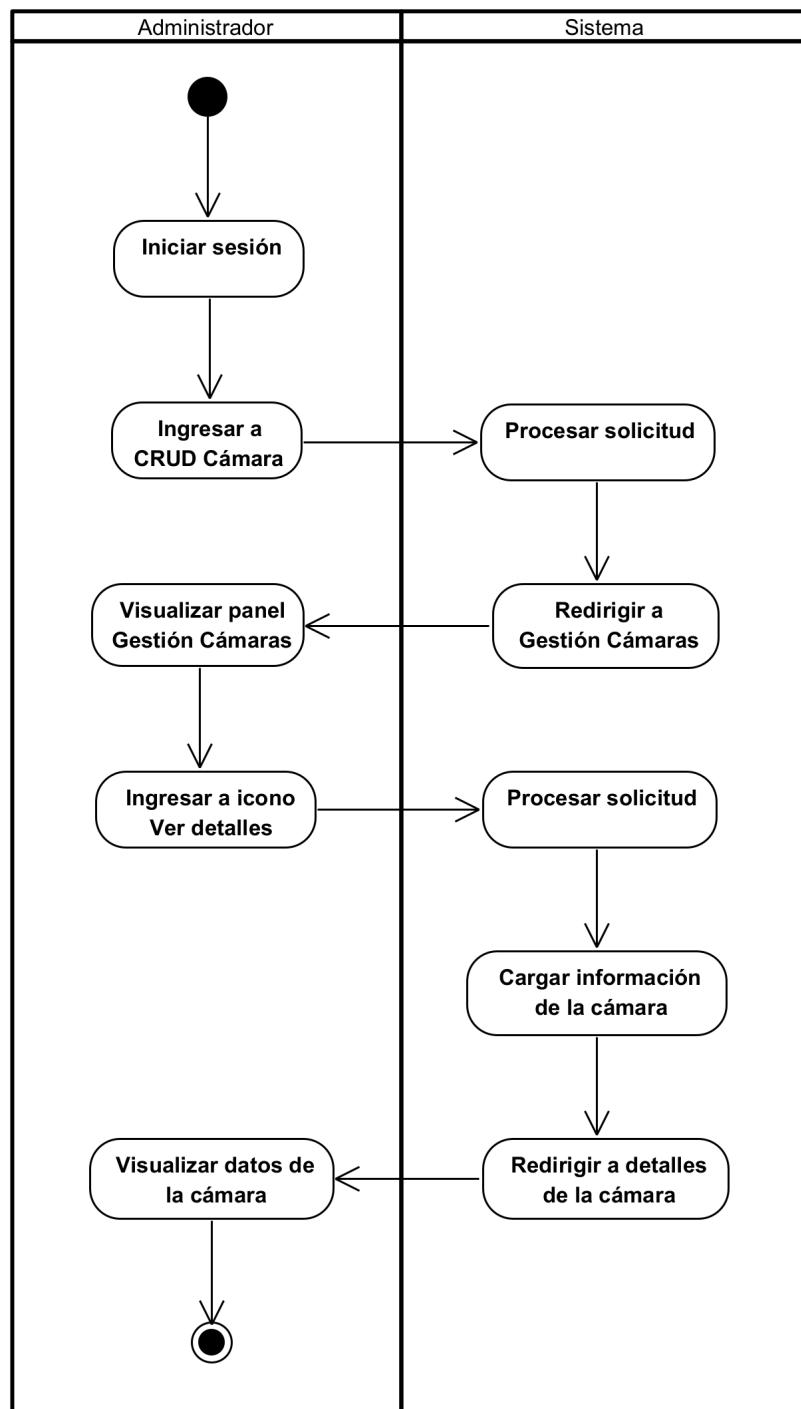
Diagrama de Actividad para Activar Cámara (RF3.1.1).



El diagrama de actividad de la Figura 48 muestra el flujo de trabajo para la activación e inicio de operación del dispositivo físico. Conforme a la descripción general proporcionada al inicio de esta sección, las calles **Administrador** y **Sistema** representan las acciones del usuario y del backend, respectivamente. La calle **Hardware**, corresponden a la lógica ejecutada por el firmware del propio dispositivo. Este flujo describe cómo el hardware gestiona su activación inicial y luego opera en un ciclo de verificación, recolección, envío y espera, interactuando con el **Sistema** cuando es necesario y gestionando su consumo de energía.

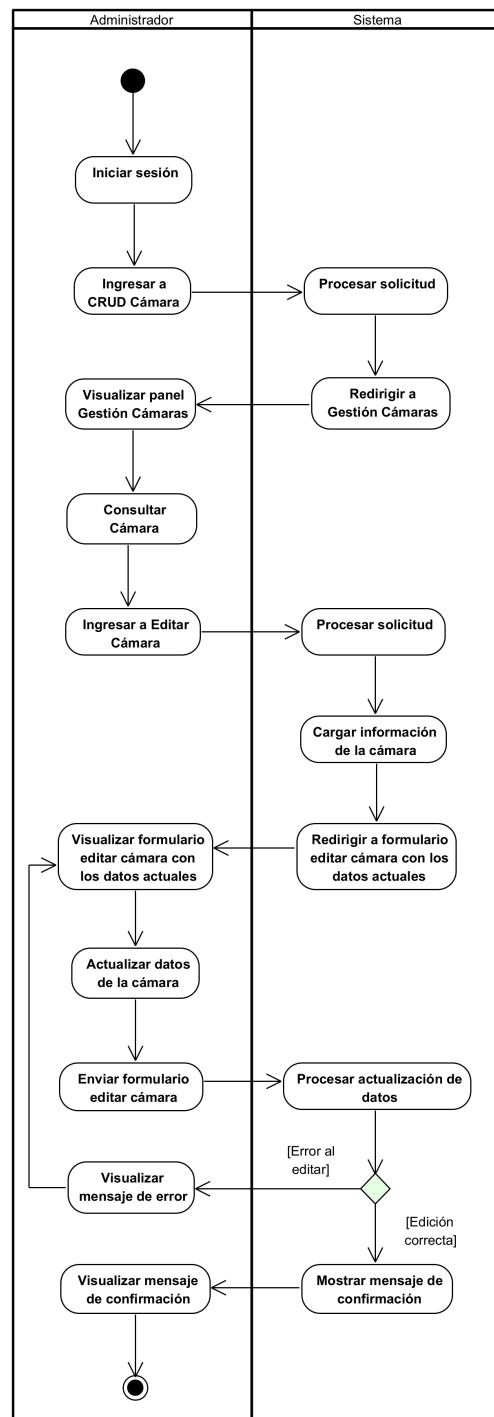
**Figura 49**

Diagrama de Actividad para Consultar Cámara (RF3.2).



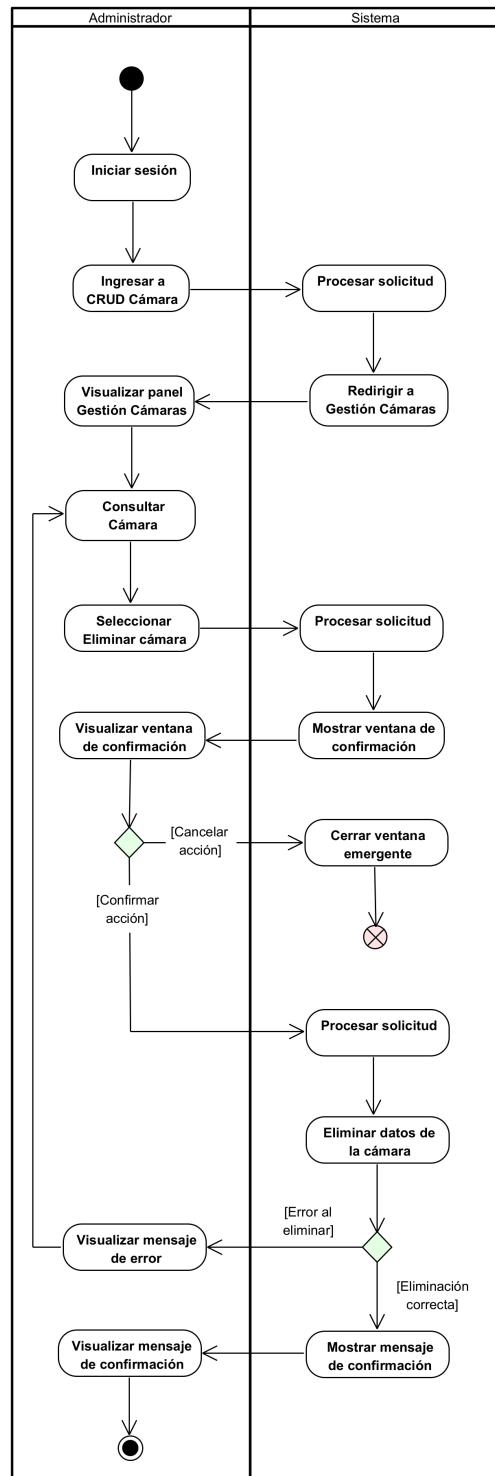
**Figura 50**

Diagrama de Actividad para Editar Cámara (RF3.3).



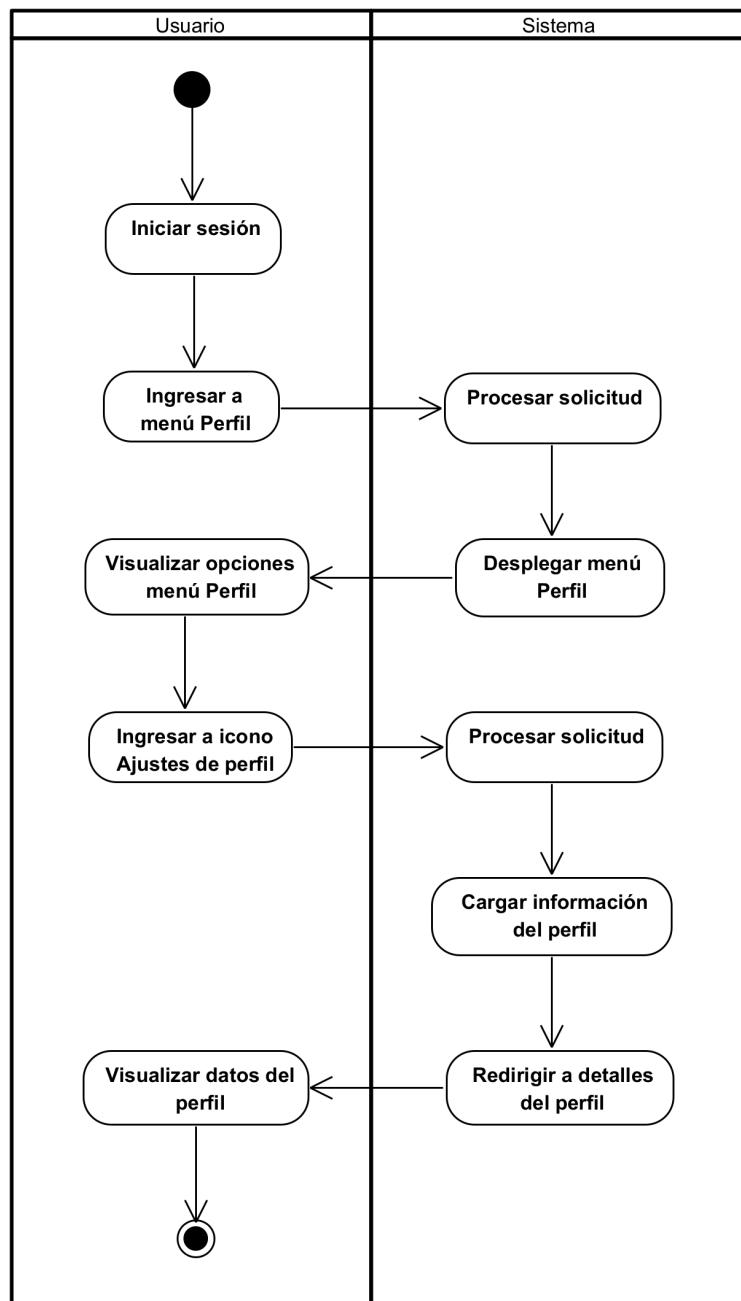
**Figura 51**

Diagrama de Actividad para Eliminar Cámara (RF3.4).



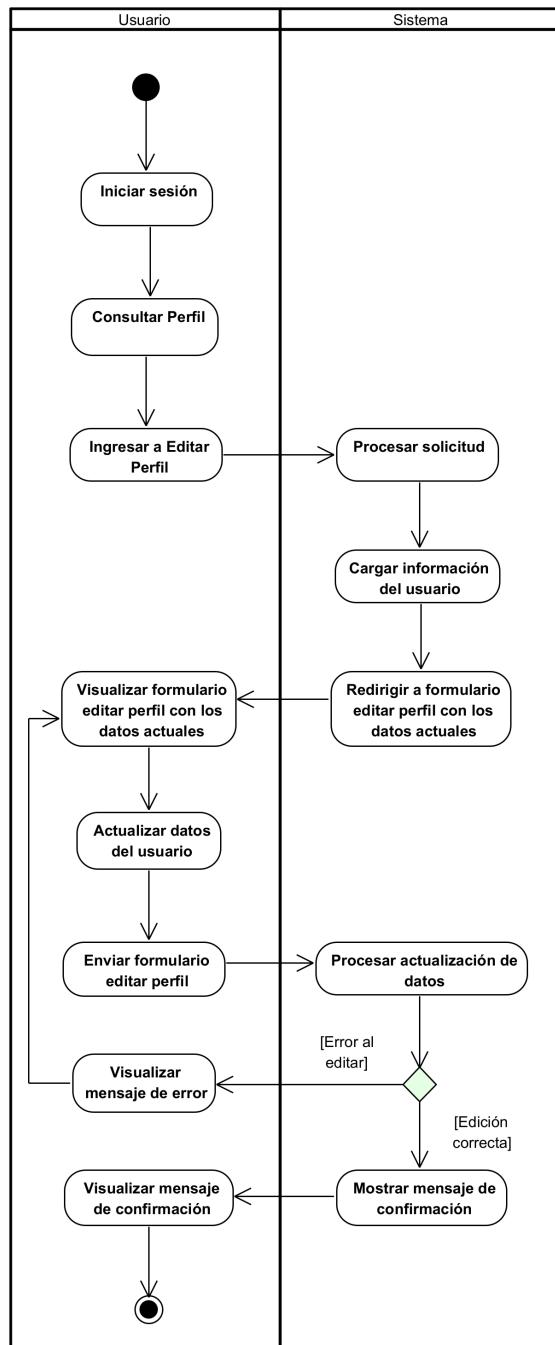
**Figura 52**

*Diagrama de Actividad para Consultar Perfil (RF4.1).*



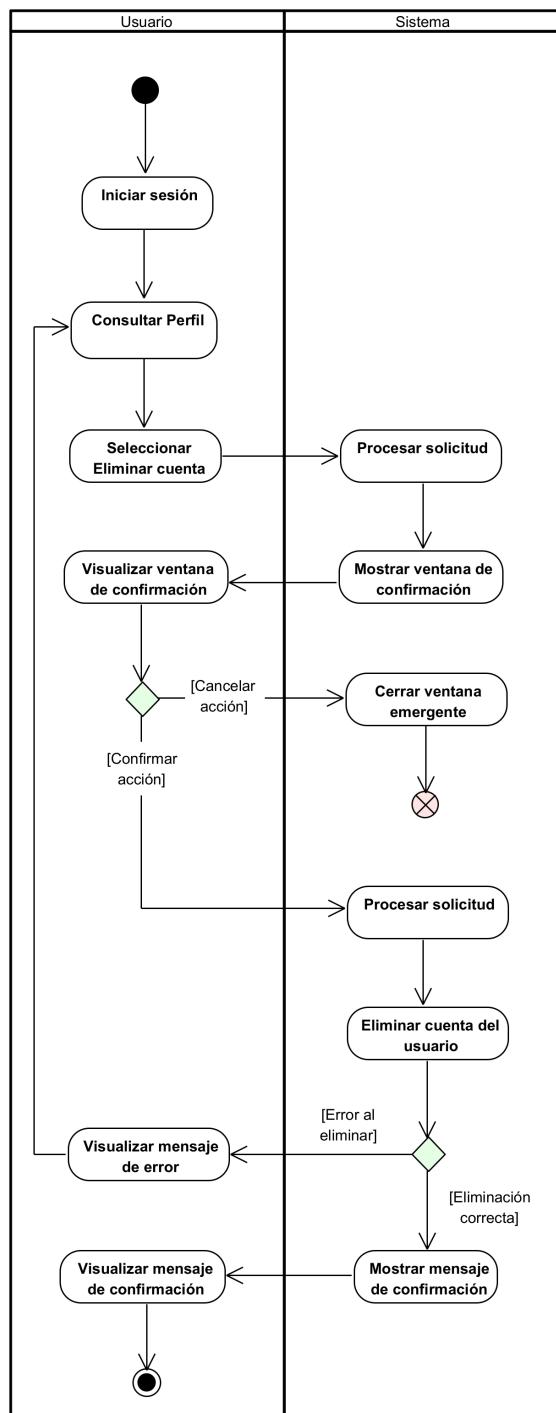
**Figura 53**

Diagrama de Actividad para Editar Perfil (RF4.2).



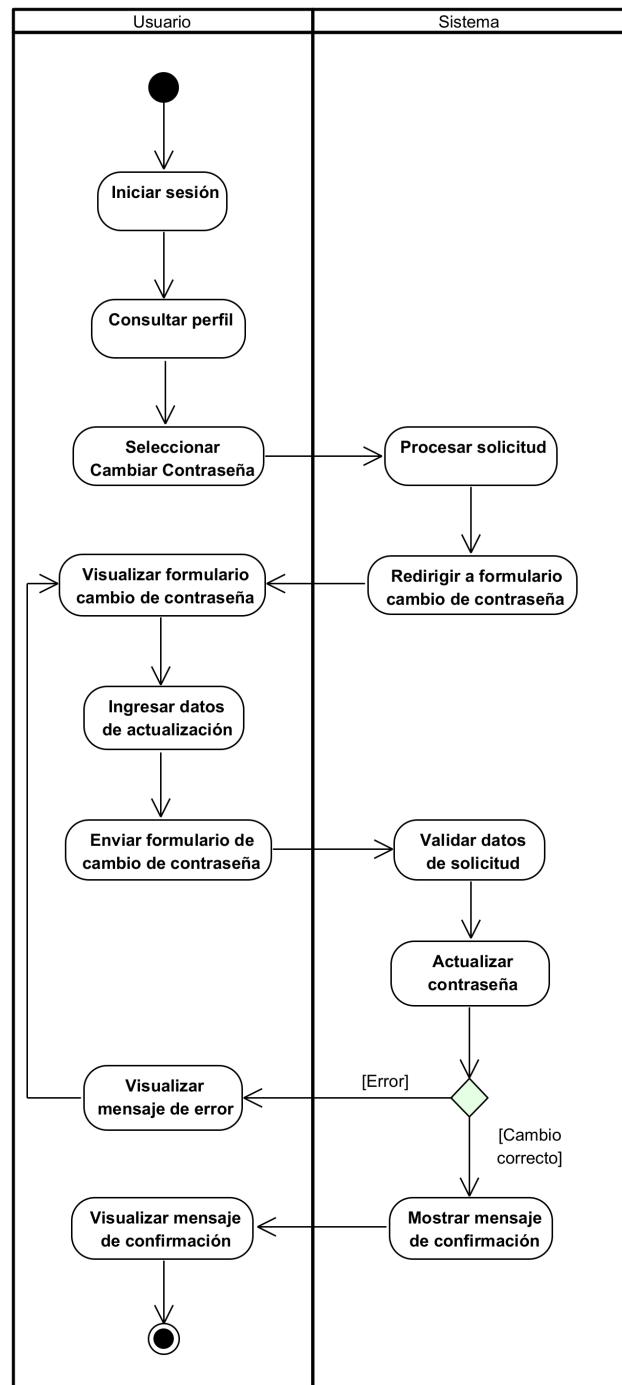
**Figura 54**

Diagrama de Actividad para Eliminar Perfil (RF4.3).



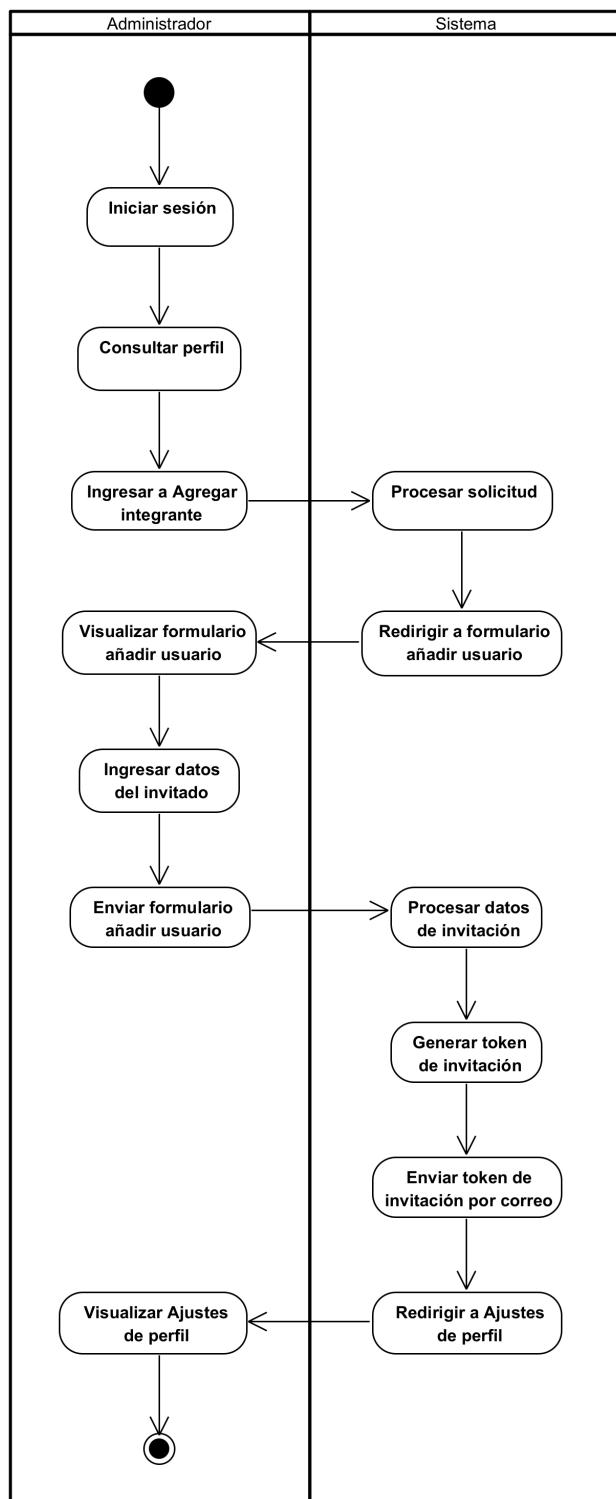
**Figura 55**

*Diagrama de Actividad para Cambiar Contraseña (RF4.4).*



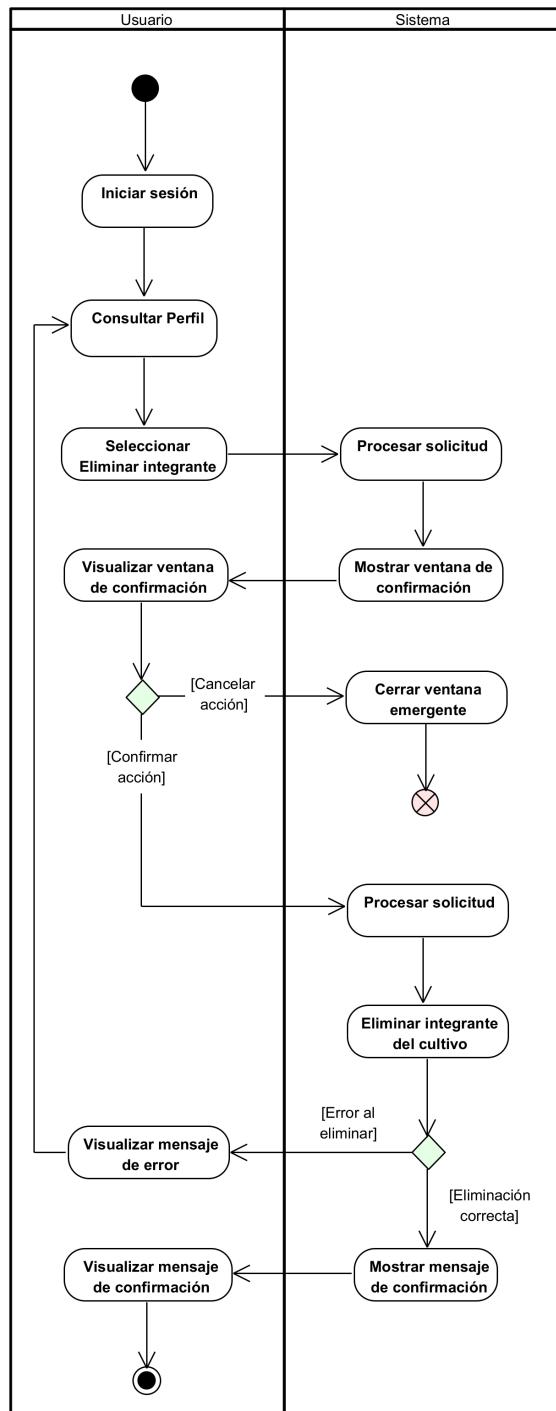
**Figura 56**

Diagrama de Actividad para Agregar Integrante de Cultivo (RF4.5).



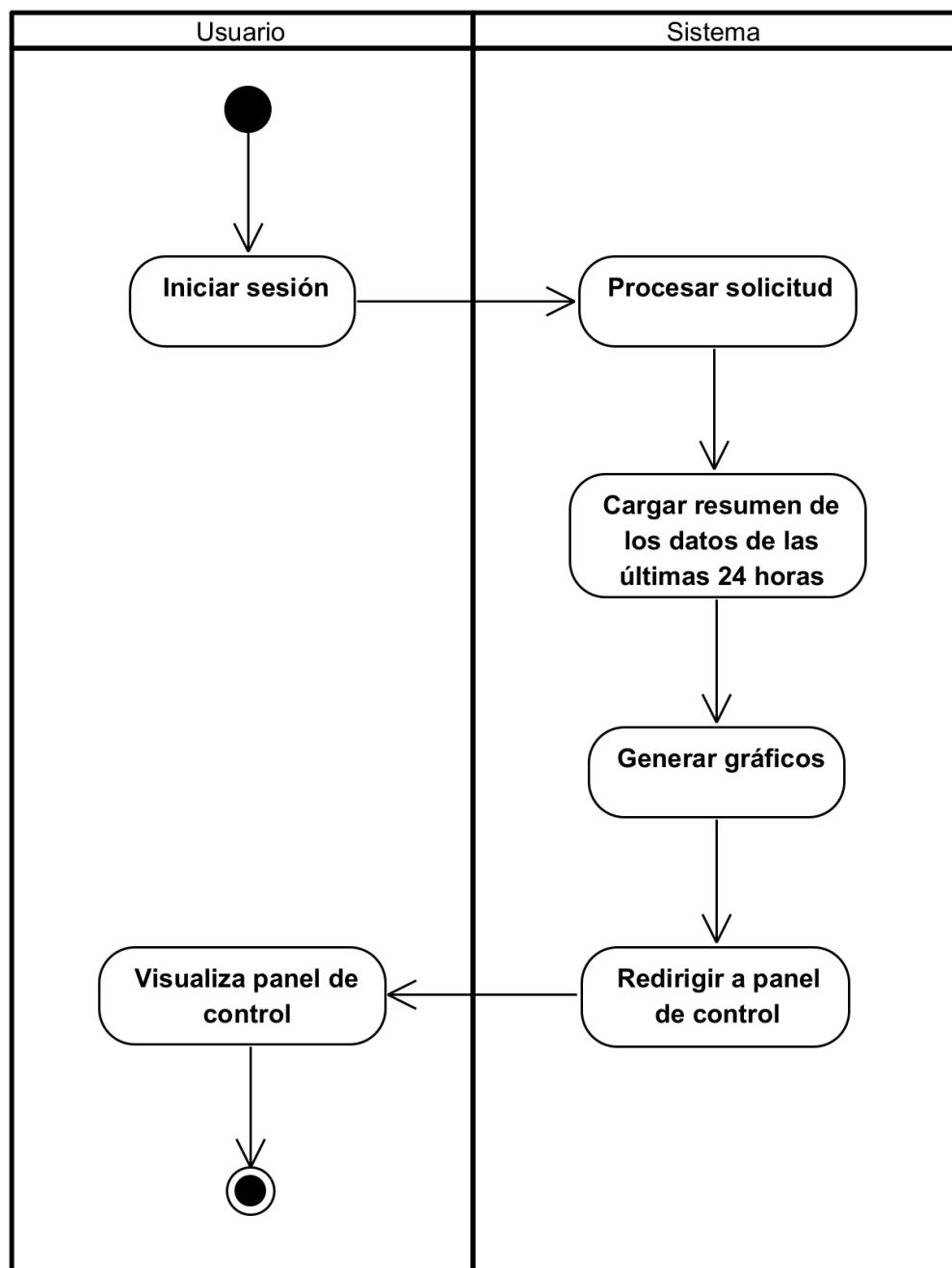
**Figura 57**

Diagrama de Actividad para Eliminar Integrante de Cultivo (RF4.6).



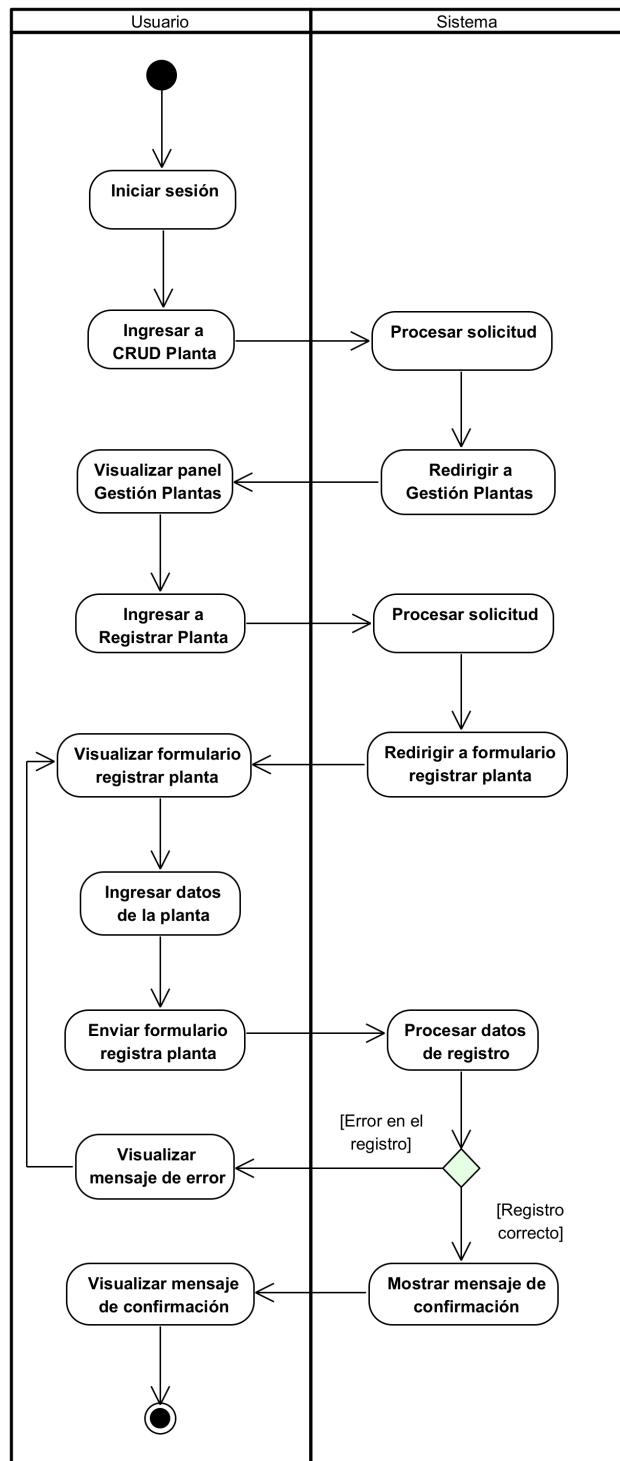
**Figura 58**

Diagrama de Actividad para el Módulo de Mediciones (RF5.0).



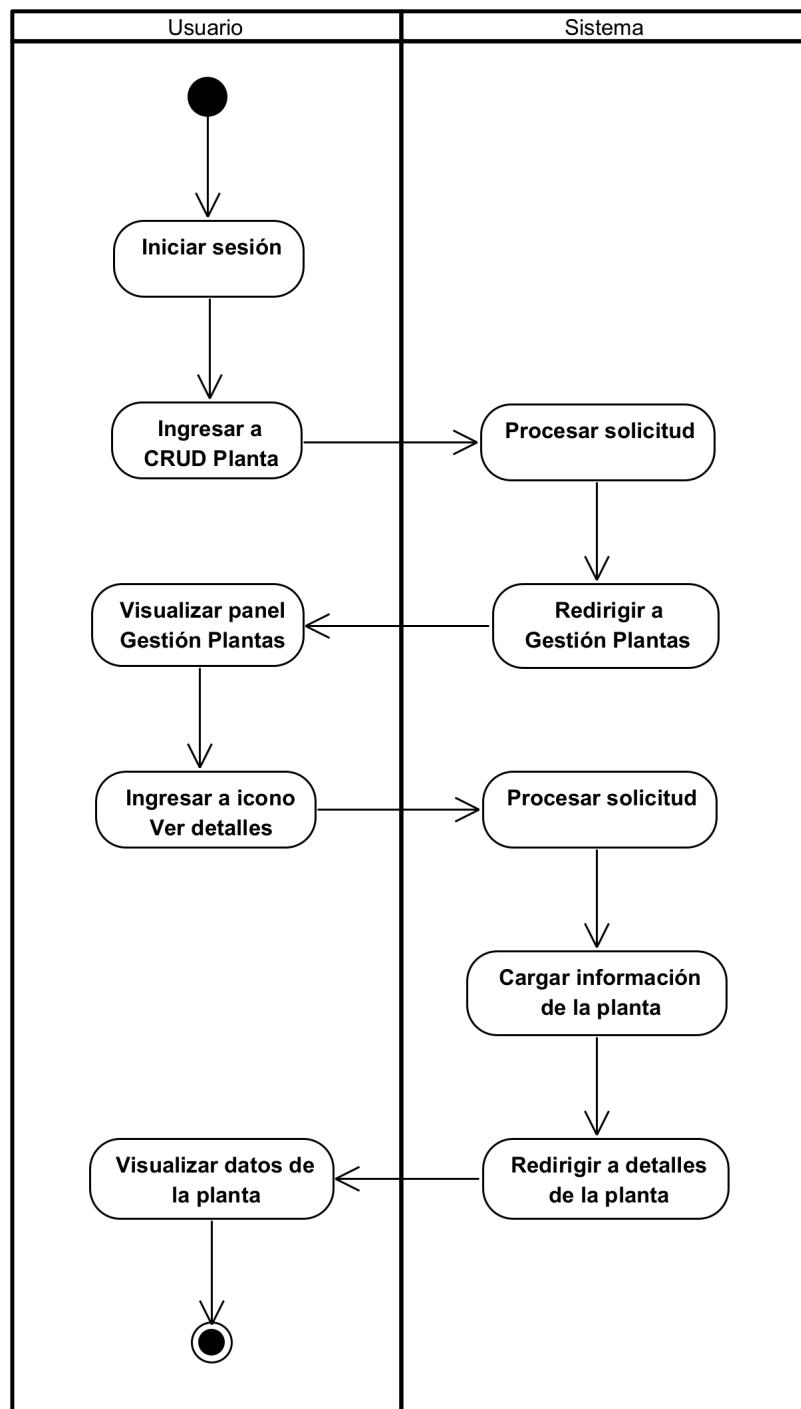
**Figura 59**

Diagrama de Actividad para Crear Planta (RF6.1).



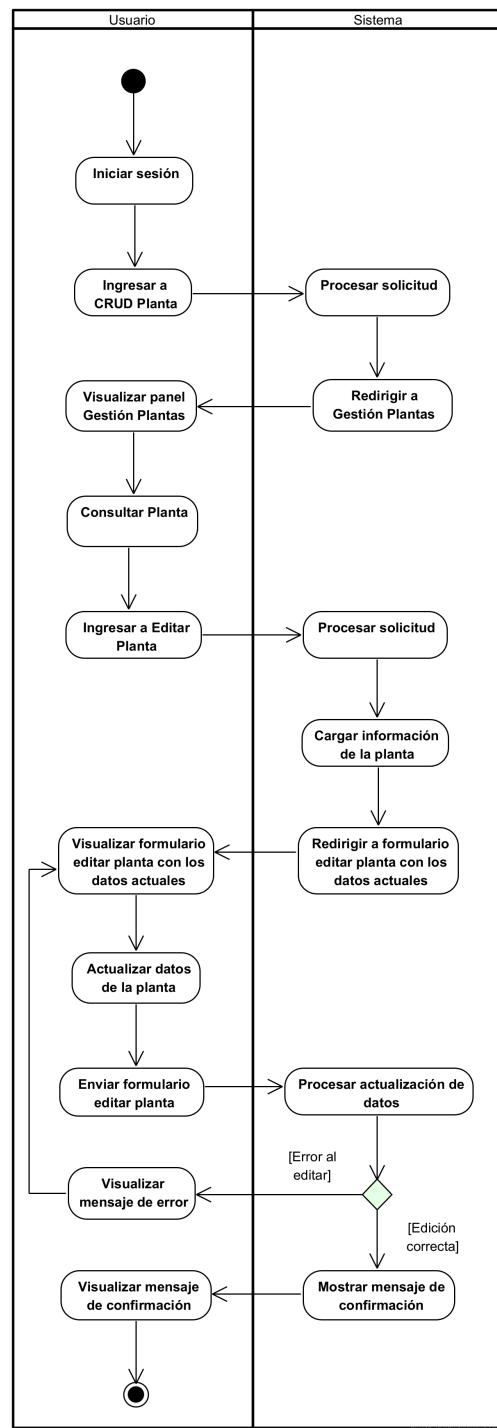
**Figura 60**

Diagrama de Actividad para Consultar Planta (RF6.2).



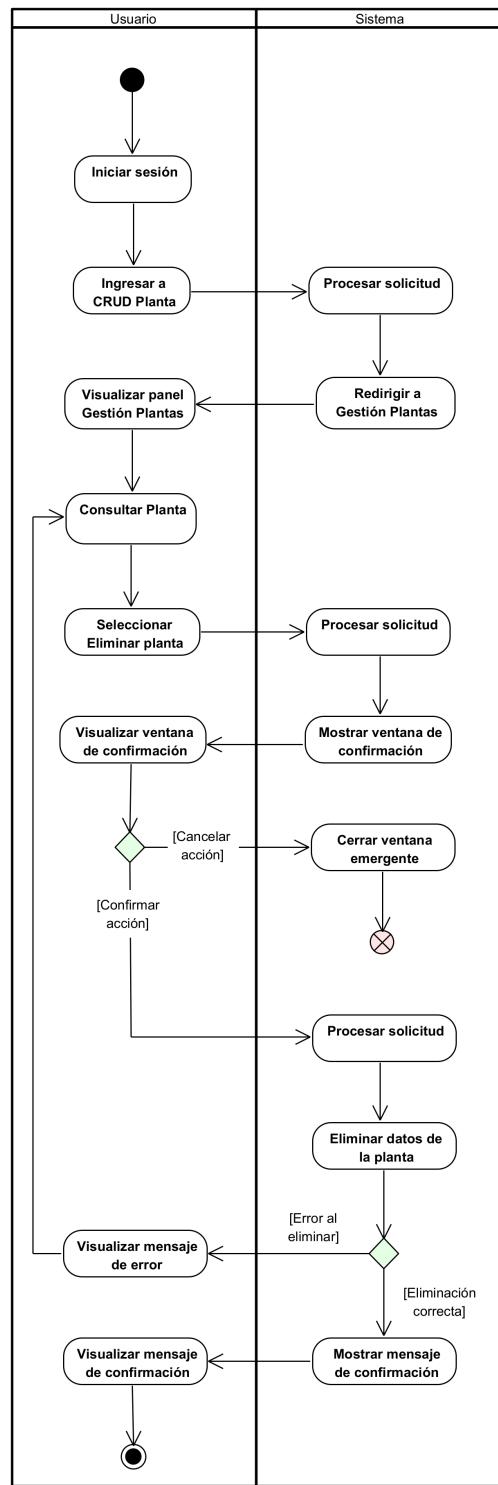
**Figura 61**

Diagrama de Actividad para Editar Planta (RF6.3).



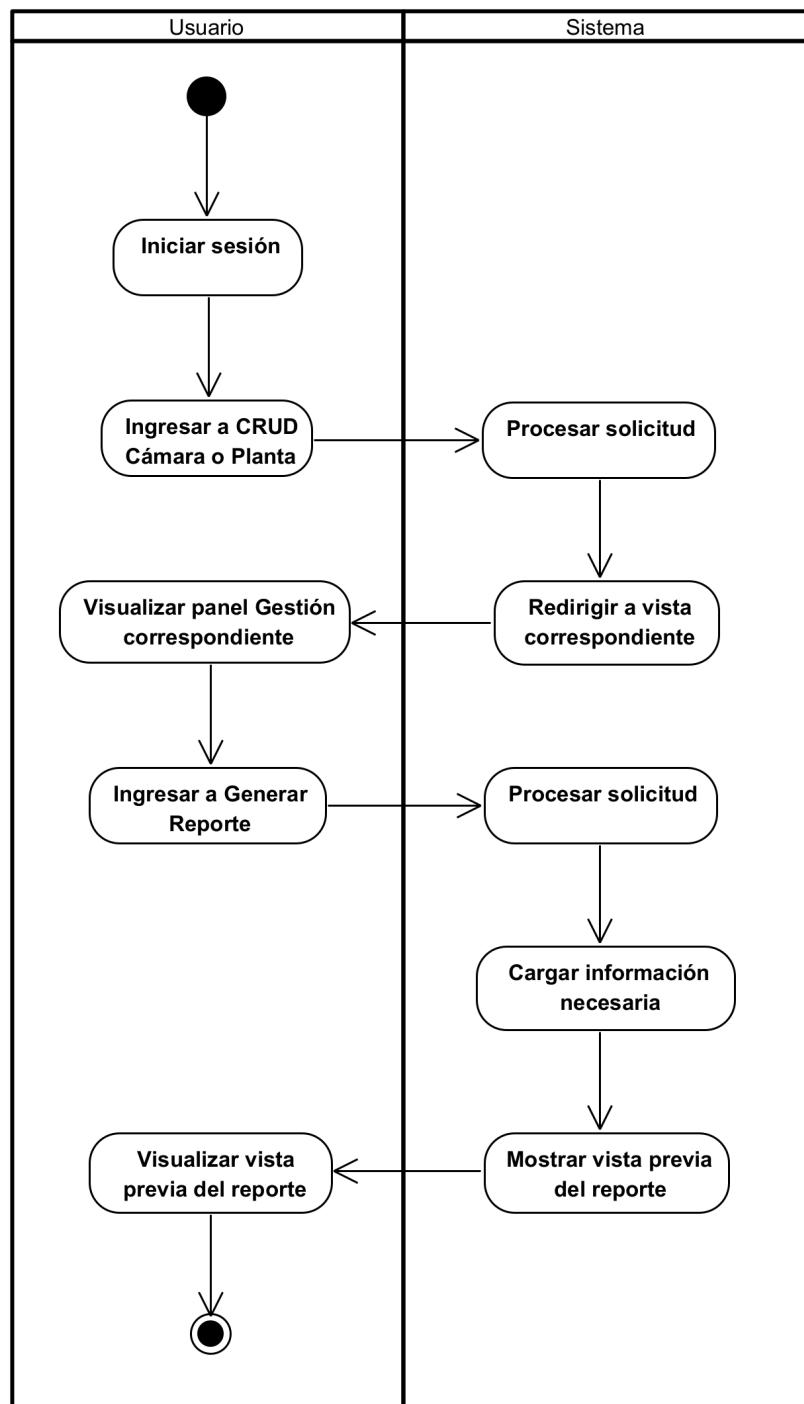
**Figura 62**

Diagrama de Actividad para Eliminar Planta (RF6.4).



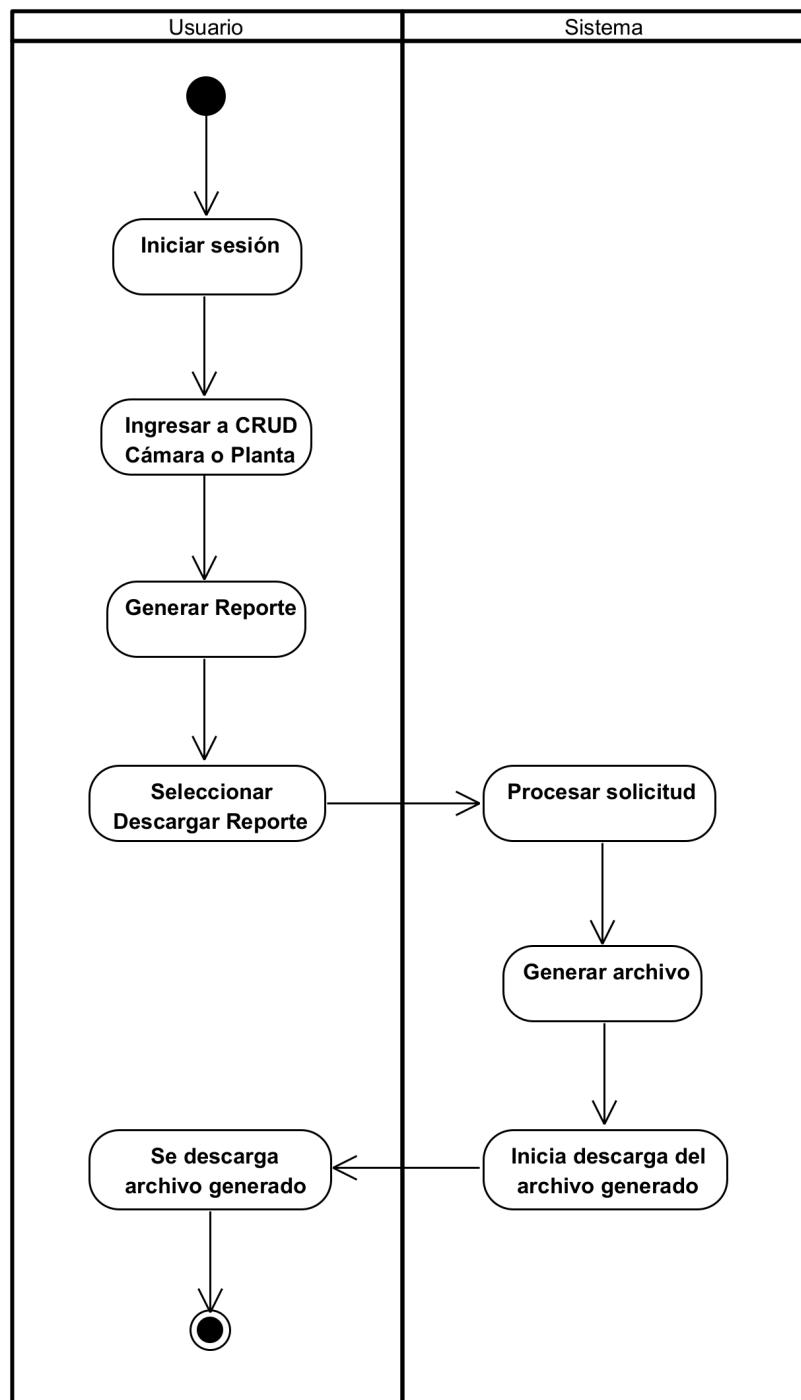
**Figura 63**

*Diagrama de Actividad para Generar Reporte (RF7.0).*



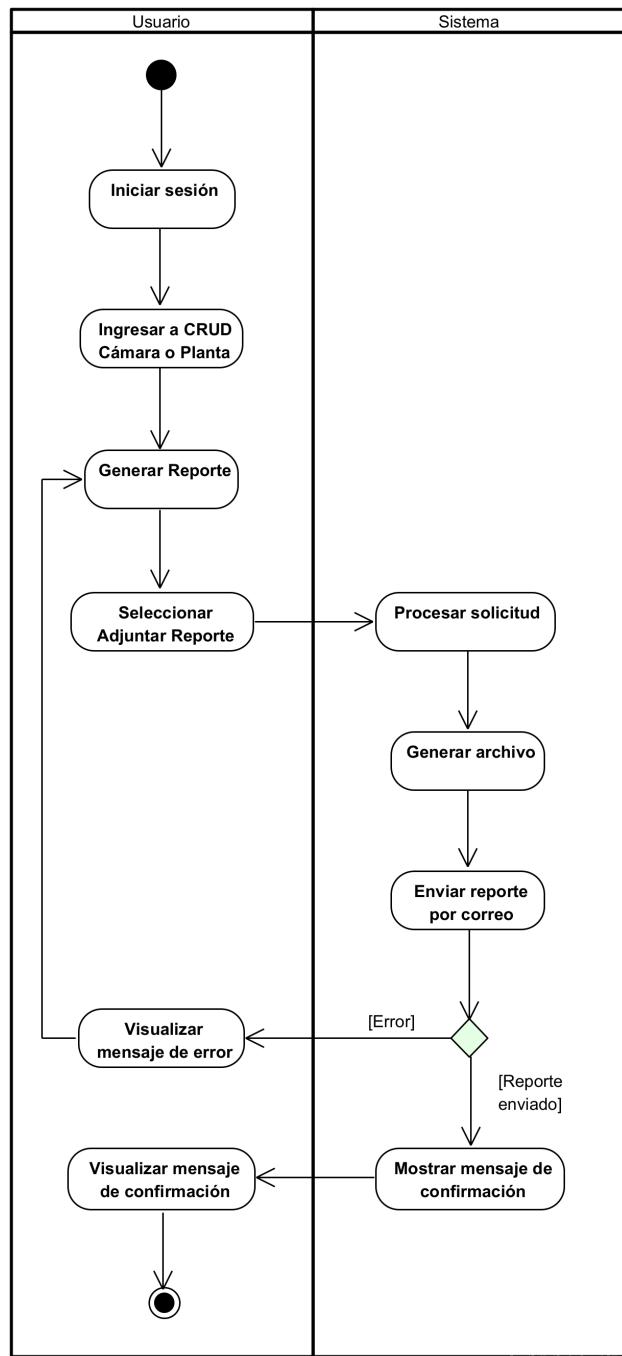
**Figura 64**

*Diagrama de Actividad para Descargar Reporte (RF7.1).*



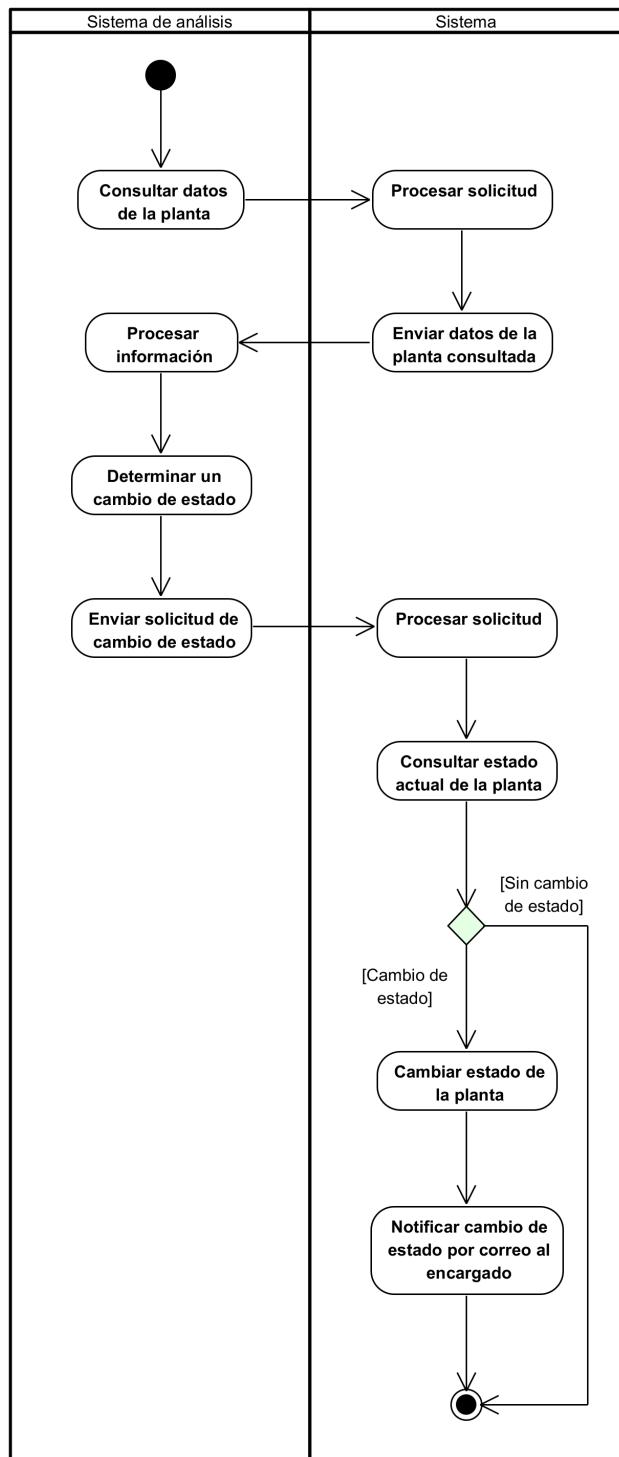
**Figura 65**

Diagrama de Actividad para Adjuntar Reporte (RF7.2).



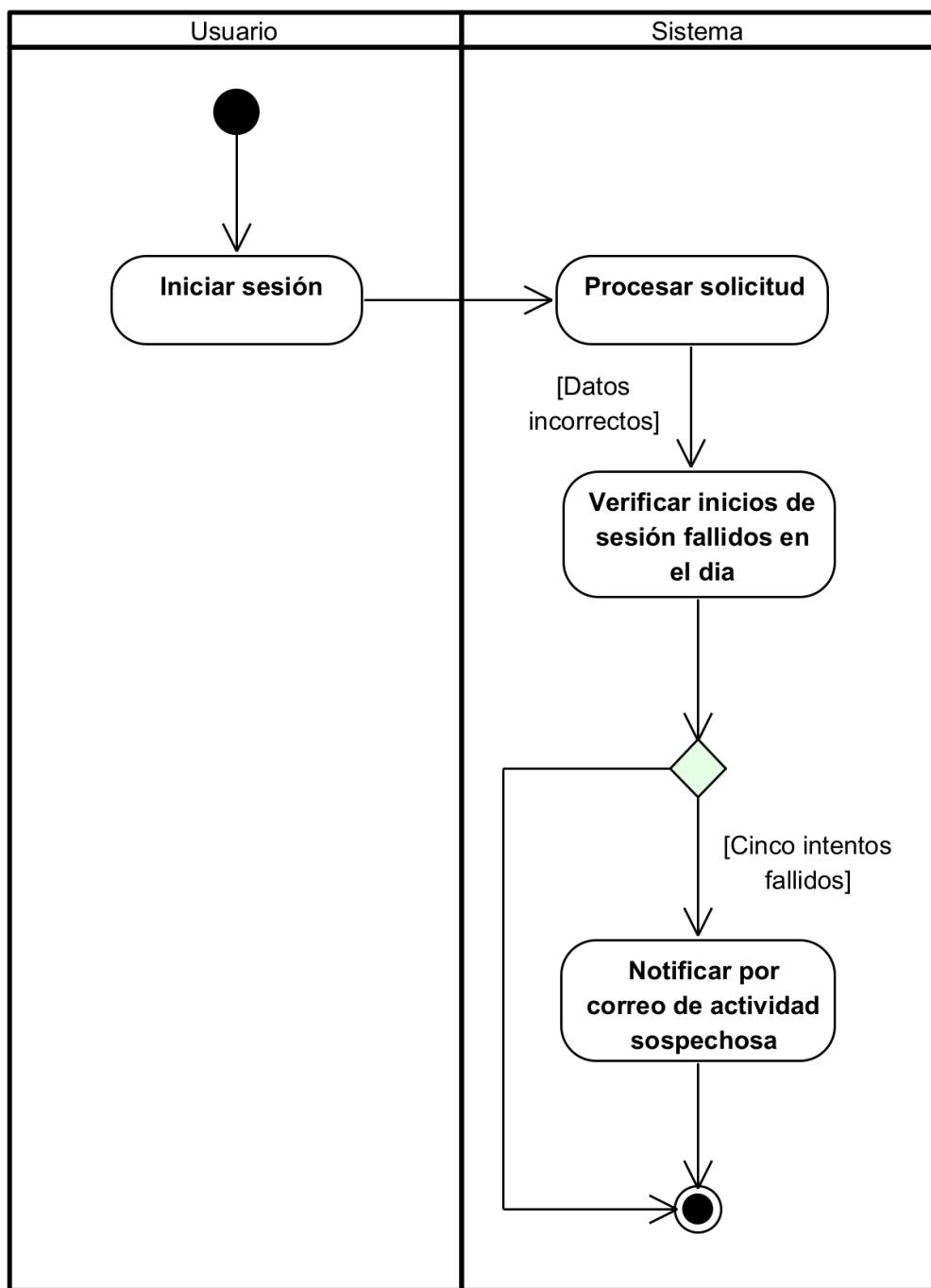
**Figura 66**

Diagrama de Actividad para Notificar Planta (RF8.1).



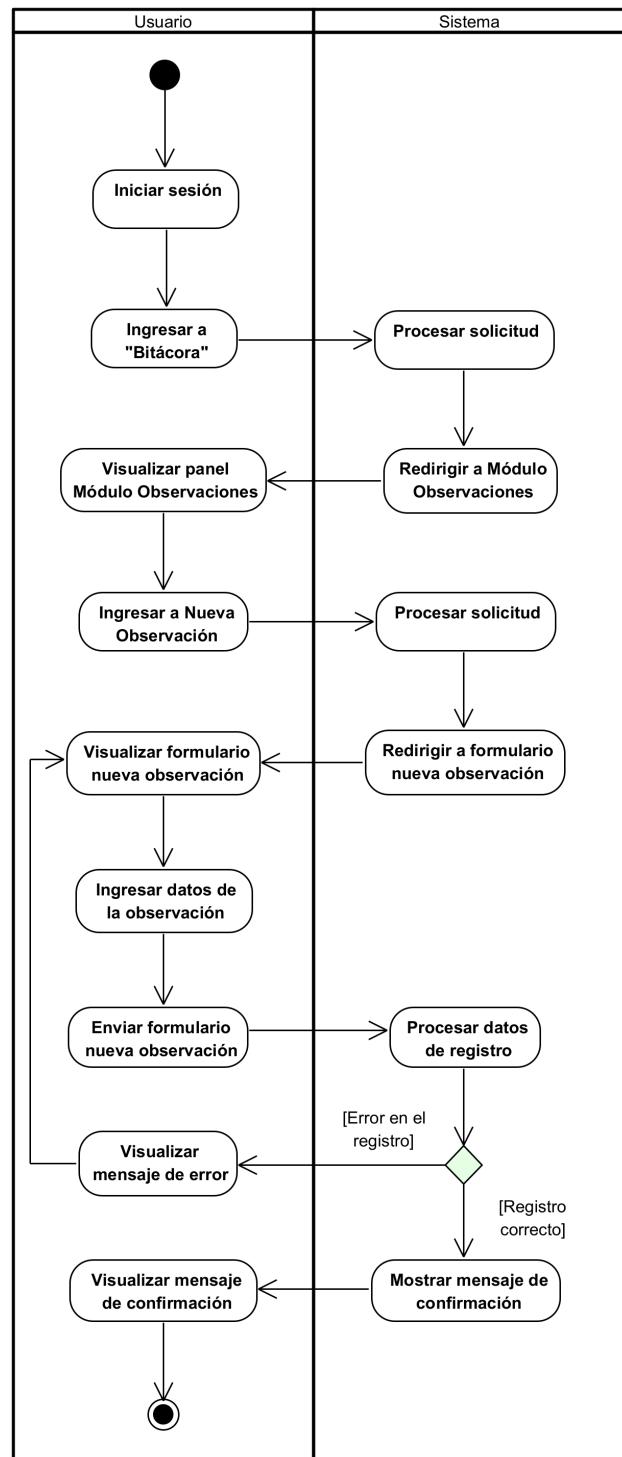
**Figura 67**

Diagrama de Actividad para Notificar Seguridad (RF8.2).



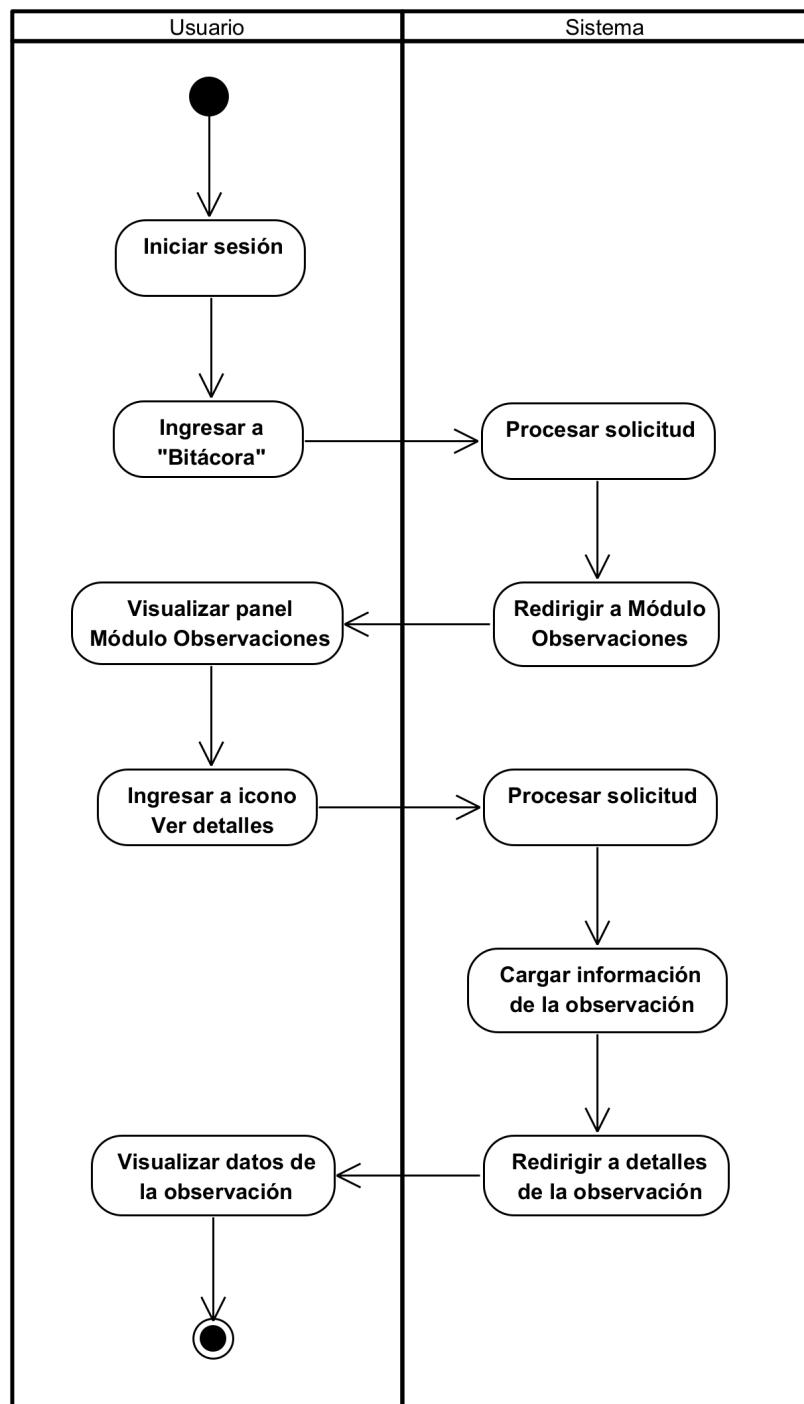
**Figura 68**

Diagrama de Actividad para Crear Observación (RF9.1).



**Figura 69**

Diagrama de Actividad para Consultar Observación (RF9.2).



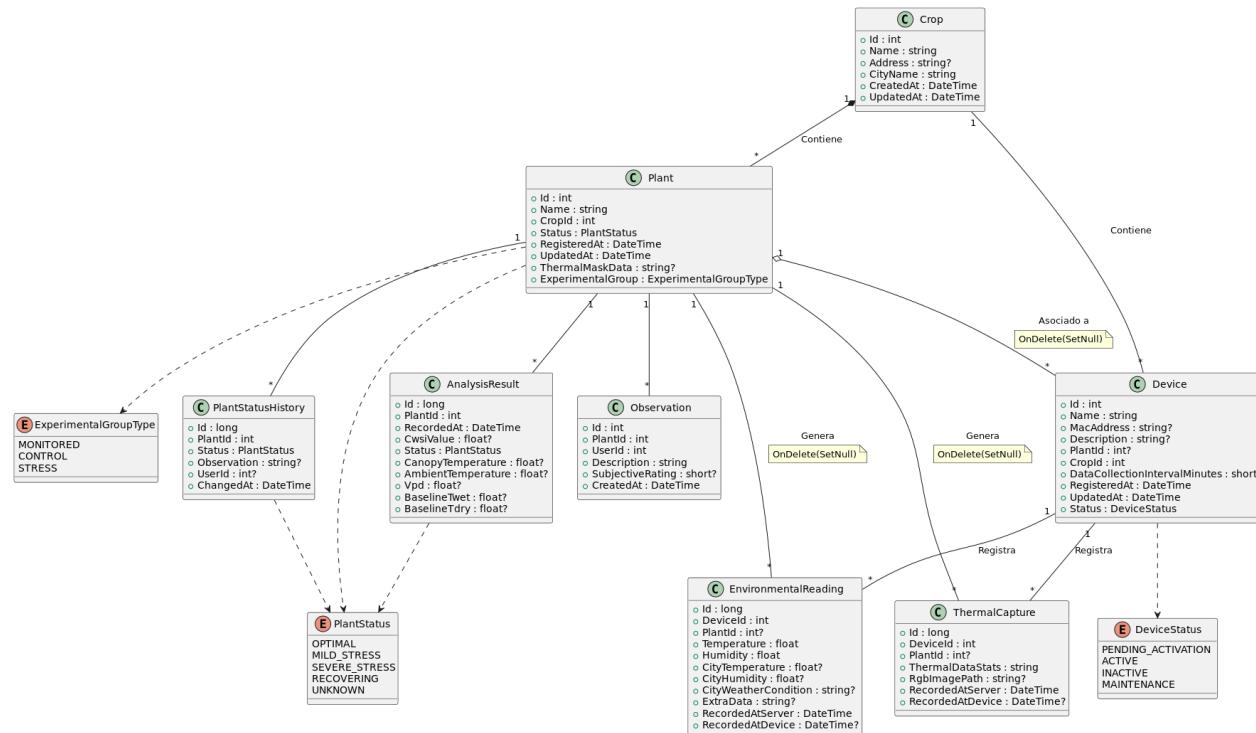
## 2.4.5. Diagrama de Clases

Una clase es la descripción de un concepto del dominio de la aplicación o del dominio de la solución (Rumbaugh y cols., 2007). Las clases son el centro alrededor del cual se organiza la vista de clases (Rumbaugh y cols., 2007). La vista estática se muestra en los diagramas de clases (Rumbaugh y cols., 2007).

En esta sección se presenta el diagrama de clases principal del sistema. Se describirán las tablas (clases) más importantes, sus atributos, las relaciones (asociaciones, generalizaciones) entre ellas y cómo estas estructuras en conjunto definen el funcionamiento general y la organización de los datos del sistema.

**Figura 70**

*Diagrama de Clases: Entidades Principales y Datos de Monitoreo.*



La Figura 70 presenta el núcleo del modelo de dominio del sistema. Se observan las entidades

centrales que representan los elementos físicos monitoreados:

- **Crop**: Representa el cultivo y actúa como la entidad contenedora principal (tenant).
- **Plant**: Modela cada planta individual dentro de un cultivo. Es una entidad central que agrega gran parte de los datos de monitoreo.
- **Device**: Representa el dispositivo físico de hardware encargado de la recolección de datos.

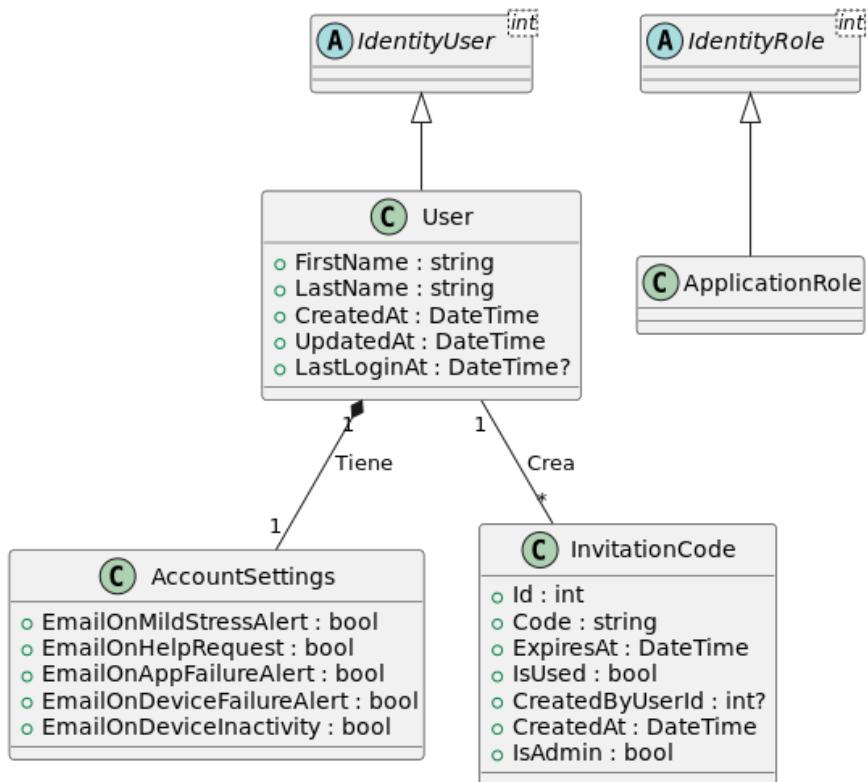
El diagrama ilustra las relaciones de composición y asociación entre estas entidades y los datos que generan o a los que están asociados:

- Un **Crop** contiene múltiples **Plant** y **Device**.
- Un **Device** está asociado a un **Crop** y opcionalmente a una **Plant** específica. La relación con **Plant** está configurada con **OnDelete(SetNull)**, lo que significa que si una planta se elimina, el campo **PlantId** en los dispositivos asociados se establecerá en nulo, pero los dispositivos no se eliminarán.
- Tanto **Plant** como **Device** están asociados a las entidades que almacenan los datos recolectados: **EnvironmentalReading** (datos de sensores ambientales) y **ThermalCapture** (datos de capturas térmicas). Las relaciones de **Plant** con estos datos también usan **OnDelete(SetNull)**.
- La entidad **Plant** también se relaciona con **AnalysisResult** (resultados del cálculo de CWSI), **PlantStatusHistory** (historial de cambios de estado) y **Observation** (anotaciones manuales de los usuarios).

Finalmente, el diagrama muestra el uso de enumeraciones (**enum**) como **PlantStatus**, **DeviceStatus** y **ExperimentalGroupType** para representar estados y clasificaciones de manera controlada y legible dentro del dominio. Se detallan todos los atributos de cada clase, especificando su tipo de dato (ej. **int**, **string**, **DateTime**, **float?**).

**Figura 71**

*Diagrama de Clases: Gestión de Usuarios y Roles.*



Continuando con el modelo de dominio, la Figura 71 ilustra las clases relacionadas con la gestión de usuarios y el control de acceso.

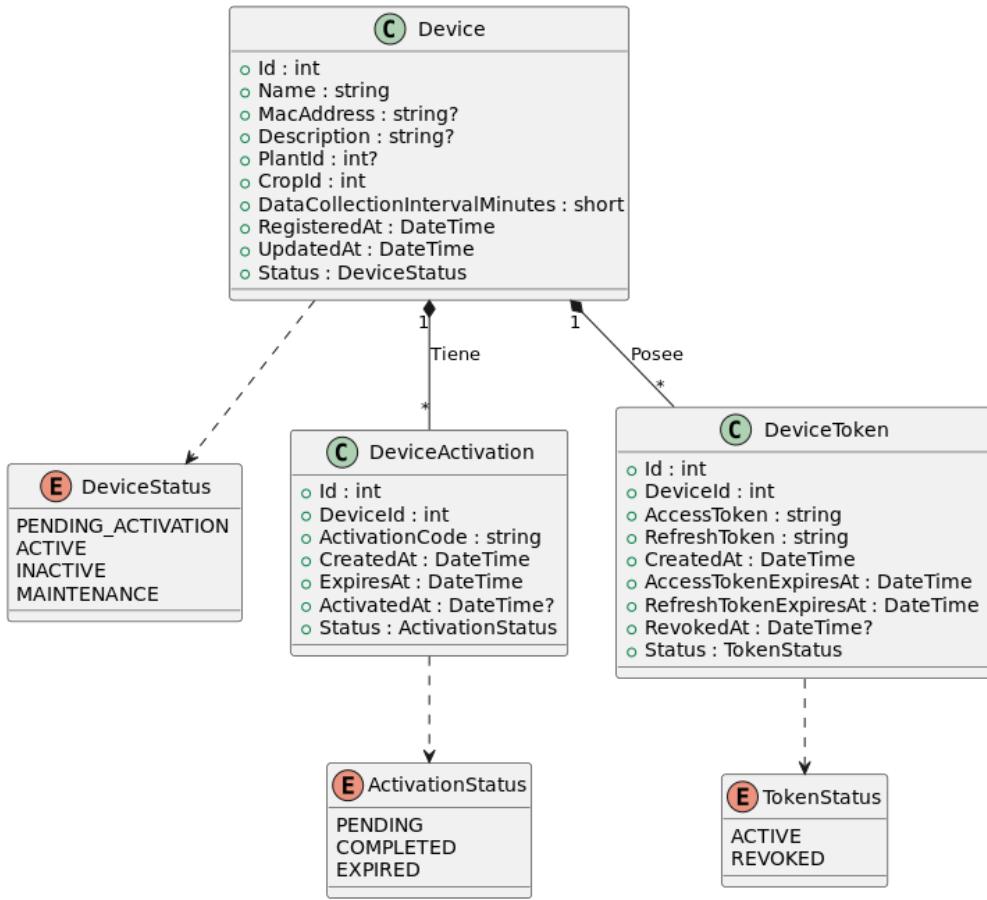
- **User**: Representa a un usuario del sistema web. Esta clase hereda de la clase base **IdentityUser<int>** proporcionada por ASP.NET Core Identity, extendiéndola con atributos personalizados como **FirstName**, **LastName**, fechas de creación/actualización y el último inicio de sesión (**LastLoginAt**).
- **ApplicationRole**: Representa un rol dentro del sistema (ej. Administrador). Hereda de **IdentityRole<int>** y, aunque no añade atributos propios, permite la integración con el sistema de roles de Identity.

- **AccountSettings**: Modela las preferencias de notificación por correo electrónico de un usuario. Existe una relación de composición fuerte (indicada por el rombo negro) entre **User** y **AccountSettings**, significando que cada usuario tiene exactamente una instancia de configuración de cuenta asociada.
- **InvitationCode**: Almacena los códigos de invitación de un solo uso para el registro de nuevos usuarios. Un **User** (administrador) puede crear múltiples códigos de invitación, representado por la asociación opcional (la relación puede tener **CreatedByUserId** nulo).

Este diagrama muestra cómo el sistema extiende las funcionalidades base de ASP.NET Core Identity para adaptarlas a las necesidades específicas del proyecto, como las configuraciones de cuenta y el flujo de invitaciones. Se detallan todos los atributos y sus tipos de dato correspondientes.

**Figura 72**

*Diagrama de Clases: Ciclo de Vida y Seguridad del Dispositivo.*



La Figura 72 detalla las clases que gestionan el ciclo de vida y la seguridad de la entidad **Device**. Este subsistema es crucial para garantizar que solo el hardware autorizado pueda interactuar con la API del sistema.

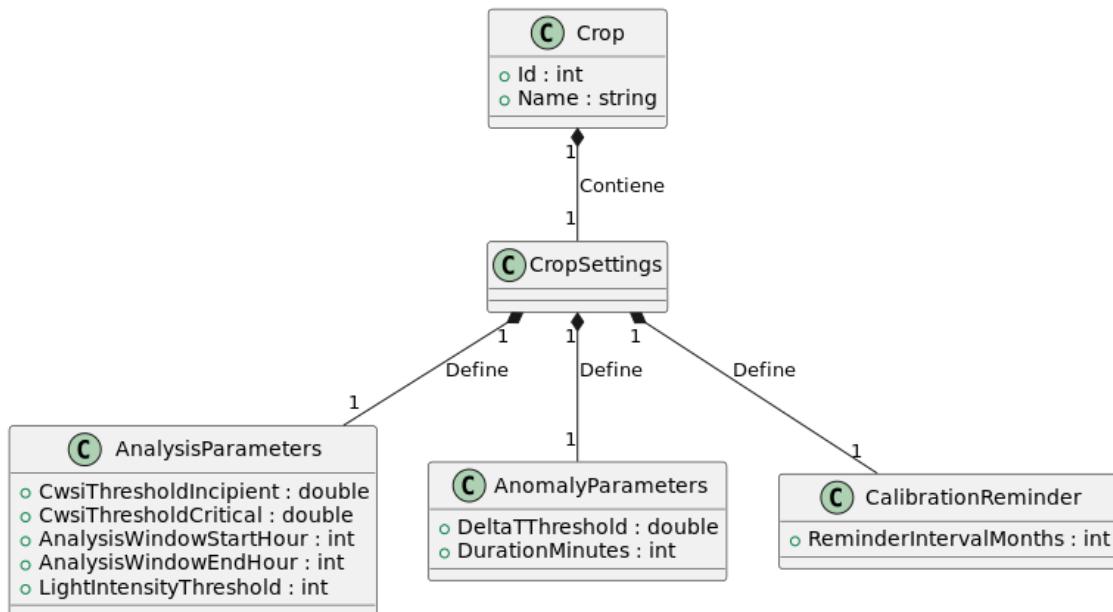
- **Device**: Es la clase central, ya presentada, que representa el dispositivo físico.
- **DeviceActivation**: Modela el proceso de activación inicial y de un solo uso de un dispositivo. Almacena el **ActivationCode**, su fecha de expiración y el estado del proceso.
- **DeviceToken**: Representa el par de tokens de autenticación (**AccessToken** y **RefreshToken**)

que se generan para un dispositivo una vez que ha sido activado. Esta clase gestiona la validez y el estado de revocación de los tokens para la autenticación continua.

El diagrama muestra una relación de composición (indicada por el rombo negro) desde **Device** hacia **DeviceActivation** y **DeviceToken**. Esto significa que la existencia de los códigos de activación y los tokens está intrínsecamente ligada a la del dispositivo; son parte fundamental de su ciclo de vida. Adicionalmente, se utilizan las enumeraciones **DeviceStatus**, **ActivationStatus** y **TokenStatus** para gestionar los estados de cada entidad de forma controlada y explícita.

**Figura 73**

*Diagrama de Clases: Configuraciones de Cultivo.*



Finalmente, la Figura 73 detalla la estructura utilizada para gestionar las configuraciones específicas de cada cultivo.

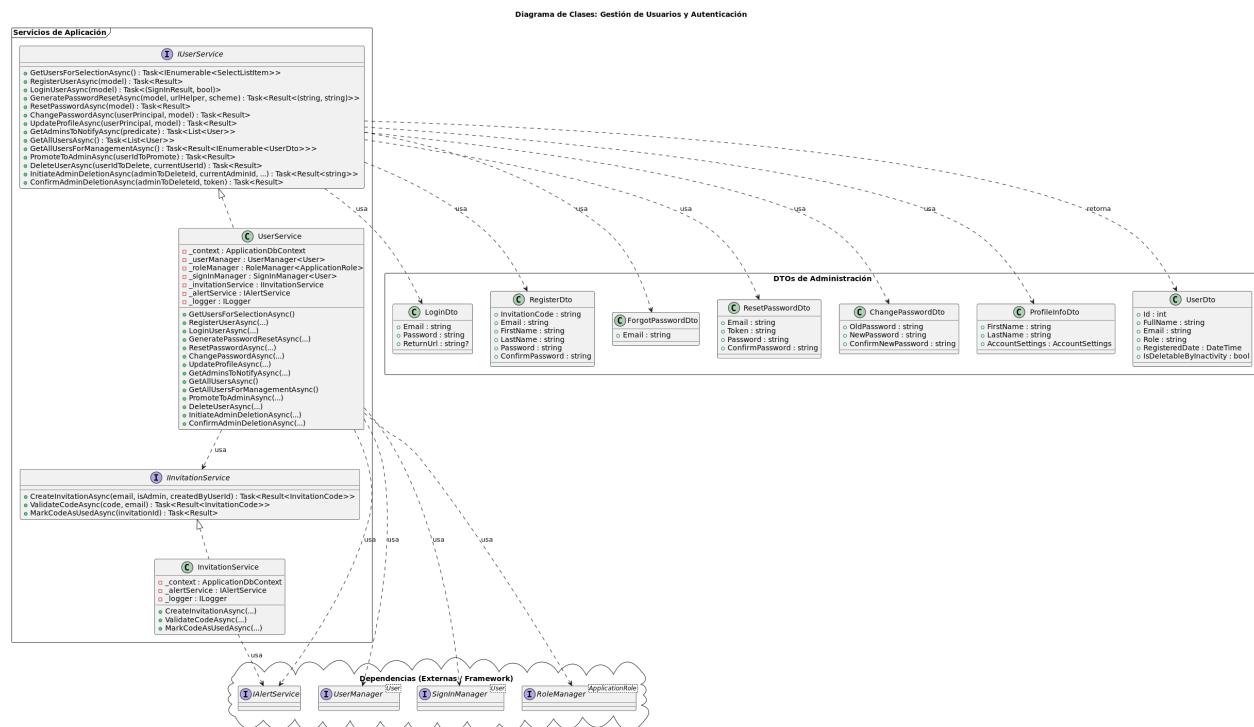
- **CropSettings:** Esta clase actúa como un contenedor principal que agrupa diferentes conjuntos de parámetros. Es parte de la entidad **Crop** a través de una relación de composición, y sus datos se almacenan en un campo de tipo **jsonb** en la base de datos.

- **AnalysisParameters**: Contiene todos los umbrales y ventanas de tiempo que controlan cómo se ejecuta el análisis de estrés hídrico (CWSI).
- **AnomalyParameters**: Define los parámetros utilizados para la detección de anomalías nocturnas en los datos de temperatura.
- **CalibrationReminder**: Especifica la frecuencia con la que se deben generar recordatorios para la calibración de los dispositivos.

La relación entre **CropSettings** y las clases de parámetros específicos (**AnalysisParameters**, etc.) es también de composición (rombo negro), indicando que estos parámetros son parte integral de la configuración general del cultivo. Esta estructura permite organizar y extender fácilmente las configuraciones del sistema en el futuro.

**Figura 74**

*Diagrama de Clases: Gestión de Usuarios y Autenticación (Capa de Aplicación).*



La Figura 74 representa el subsistema de la capa de aplicación encargado de la gestión de usuarios y la autenticación. Este diagrama ilustra las interacciones clave y las dependencias de los servicios que implementan esta lógica.

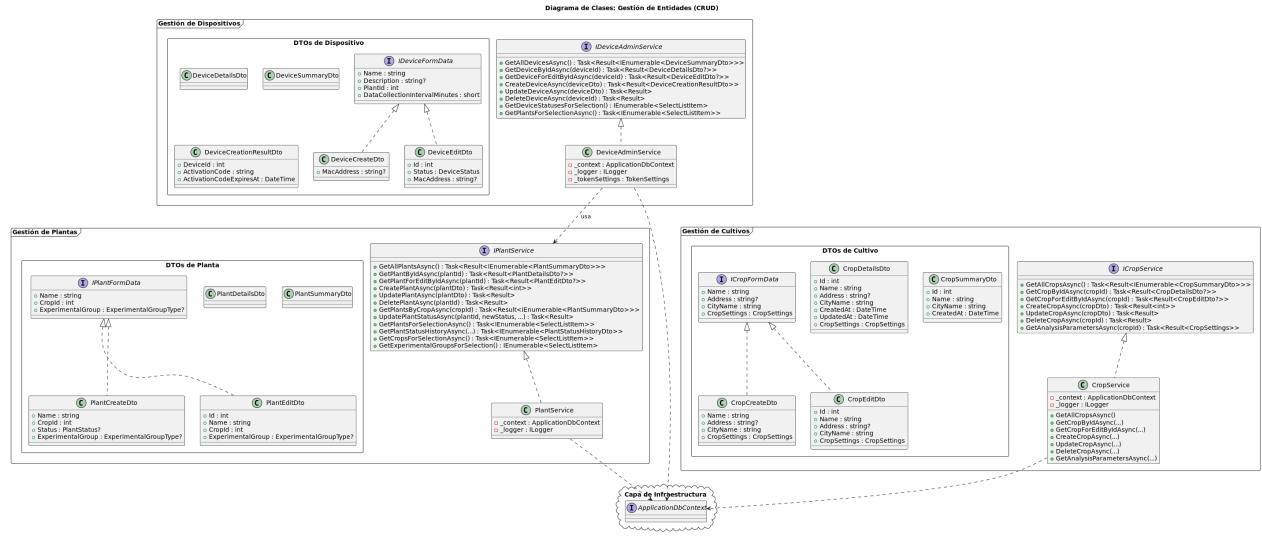
- **Servicios Principales:** Se destacan las interfaces `IUserService` e `IInvitationService`, que definen los contratos para la gestión de usuarios e invitaciones, respectivamente. Sus implementaciones concretas, `UserService` e `InvitationService`, contienen la lógica de negocio detallada.
- **Data Transfer Objects (DTOs):** Se muestra el paquete `DTOs` de `Administración`, que agrupa las clases utilizadas para transferir datos entre la capa de presentación y los servicios. Clases como `LoginDto`, `RegisterDto`, `ChangePasswordDto`, y `ProfileInfoDto` encapsulan la información necesaria para operaciones específicas como el inicio de sesión, registro, cambio de contraseña y actualización de perfil. `UserDto` se utiliza para presentar información resumida de los usuarios en las vistas de administración.
- **Dependencias:** El diagrama evidencia las dependencias de los servicios de aplicación con componentes del framework ASP.NET Core Identity (`UserManager`, `SignInManager`, `RoleManager`) para la gestión subyacente de usuarios y sesiones. También se muestra la dependencia con la interfaz `IAlertService` (definida en la capa de aplicación pero implementada en infraestructura) para el envío de notificaciones por correo electrónico.
- **Flujo de Responsabilidades:** El `UserService` actúa como orquestador principal para la mayoría de las operaciones del ciclo de vida del usuario, interactuando con los gestores de Identity y delegando la lógica de invitaciones al `IInvitationService`.

Este diagrama detalla todos los atributos y métodos públicos de las clases de servicio e interfaces, así como los atributos de los DTOs, proporcionando una vista completa de la estructura y las

responsabilidades de este módulo fundamental.

**Figura 75**

*Diagrama de Clases: Gestión de Entidades (CRUD) (Capa de Aplicación).*



La Figura 75 detalla los subsistemas dentro de la capa de aplicación responsables de las operaciones de Creación, Lectura, Actualización y Eliminación (CRUD) para las entidades principales: Cultivo, Planta y Dispositivo. El diagrama se organiza en tres paquetes lógicos principales:

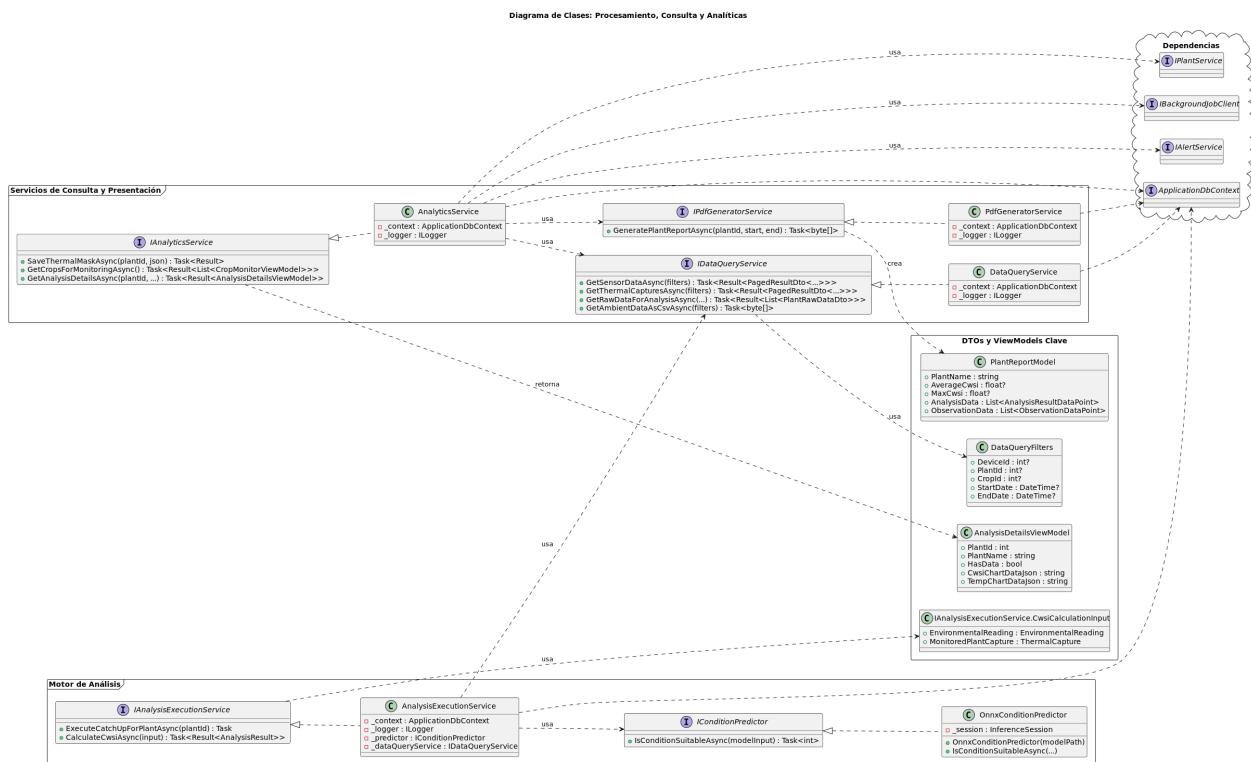
- **Gestión de Cultivos:** Incluye la interfaz **ICropService** y su implementación **CropService**, junto con los DTOs asociados (**CropCreateDto**, **CropEditDto**, **CropDetailsDto**, **CropSummaryDto**) que definen los datos necesarios para interactuar con las operaciones CRUD de los cultivos desde la capa de presentación.
- **Gestión de Plantas:** Contiene la interfaz **IPlantService** y su implementación **PlantService**, acompañados de sus DTOs correspondientes (**PlantCreateDto**, **PlantEditDto**, **PlantDetailsDto**, **PlantSummaryDto**). Este servicio gestiona el ciclo de vida de las plantas.
- **Gestión de Dispositivos (Administración):** Presenta la interfaz **IDeviceAdminService** y su implementación **DeviceAdminService**, junto con los DTOs específicos (**DeviceCreateDto**,

DeviceEditDto, DeviceDetailsDto, DeviceSummaryDto, DeviceCreationResultDto) para la administración de los dispositivos de hardware desde la interfaz web.

Se observa que todos estos servicios dependen principalmente del ApplicationDbContext (ubicado en la capa de infraestructura) para interactuar con la base de datos. Además, existen dependencias entre servicios, como la de DeviceAdminService hacia IPlantService, necesaria para poblar listas desplegables en los formularios de dispositivos. Las interfaces ICropFormData, IPlantFormData, y IDeviceFormData actúan como contratos comunes para los DTOs de creación y edición, promoviendo la consistencia. El diagrama incluye los atributos y métodos públicos de todas las clases e interfaces representadas.

**Figura 76**

*Diagrama de Clases: Interacción con Dispositivos y Envío de Datos (Capa de Aplicación).*



La Figura 76 ilustra la arquitectura de la API de la capa de aplicación, que sirve como punto de

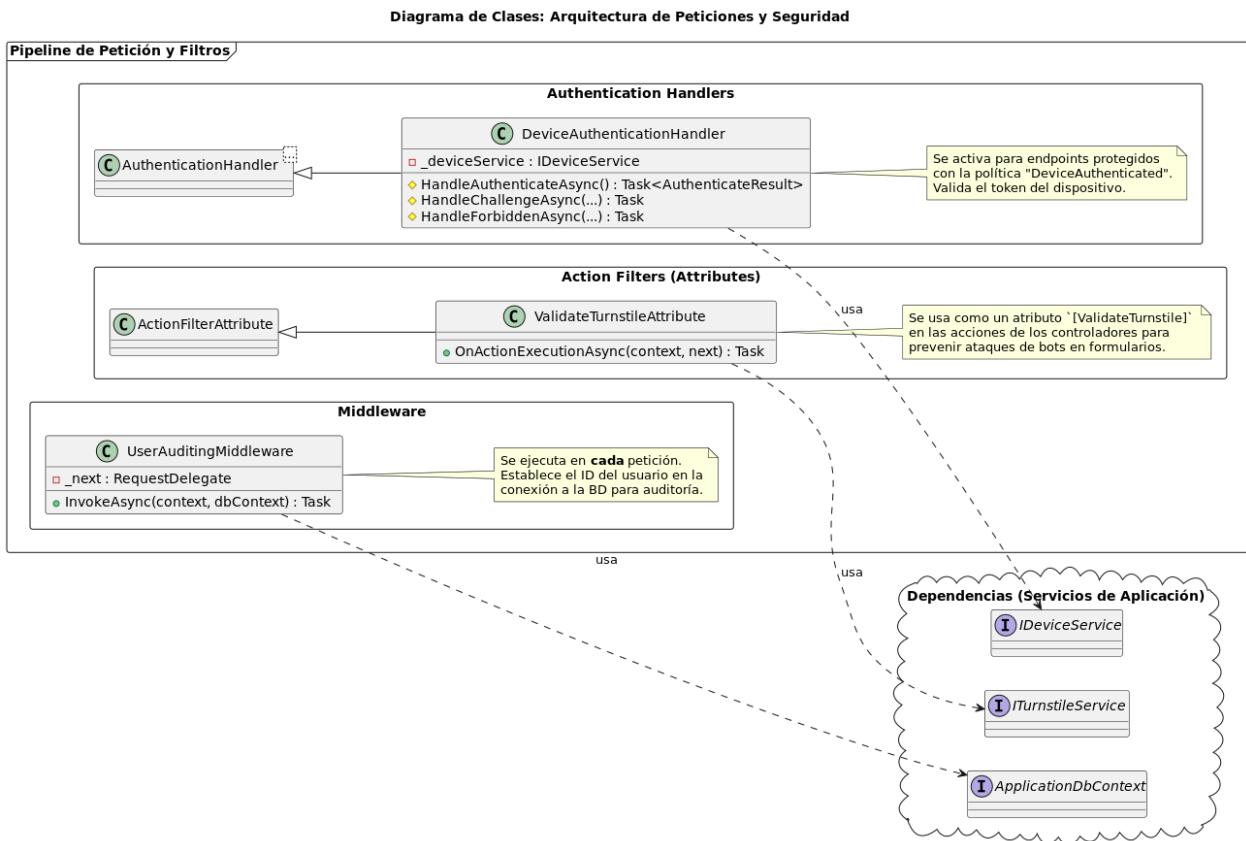
entrada para toda la comunicación proveniente de los dispositivos de hardware.

- **Servicios de API:** El diagrama muestra las dos interfaces principales que definen esta frontera de comunicación:
  - **IDeviceService:** Es responsable de todo el ciclo de vida de la autenticación del dispositivo, incluyendo la activación inicial, la validación de tokens y la generación de nuevos tokens de acceso y refresco.
  - **IDataSubmissionService:** Se encarga de recibir y procesar todos los datos enviados por los dispositivos una vez que están autenticados, como las lecturas ambientales y las capturas térmicas.
- **Data Transfer Objects (DTOs) de la API:** Se detalla un conjunto completo de DTOs que actúan como contratos de datos para la API. Clases como **DeviceActivationRequestDto**, **DeviceAuthRequestDto**, **AmbientDataDto** y **ThermalDataDto** definen la estructura exacta de los payloads (generalmente en formato JSON) que los dispositivos deben enviar en sus peticiones. Del mismo modo, DTOs como **DeviceActivationResponseDto** definen la estructura de las respuestas del servidor.
- **Dependencias de Infraestructura:** Se visualizan las dependencias de estos servicios con componentes de la capa de infraestructura. El **DataSubmissionService** depende de **IWeatherService** para enriquecer los datos y de **IFileStorageService** para almacenar imágenes. Por su parte, el **DeviceService** depende del **ApplicationDbContext** para la persistencia y de **TokenSettings** para la configuración de la duración de los tokens.

Este diagrama es clave para entender la interfaz programática que el firmware de los dispositivos de hardware debe consumir para interactuar correctamente con el sistema.

**Figura 77**

Diagrama de Clases: Arquitectura de Peticiones y Seguridad.



La Figura 77 ilustra los componentes clave de las capas de Infraestructura y Presentación que intervienen en el procesamiento y la seguridad de las peticiones HTTP entrantes, antes de que lleguen a la lógica de negocio de los controladores.

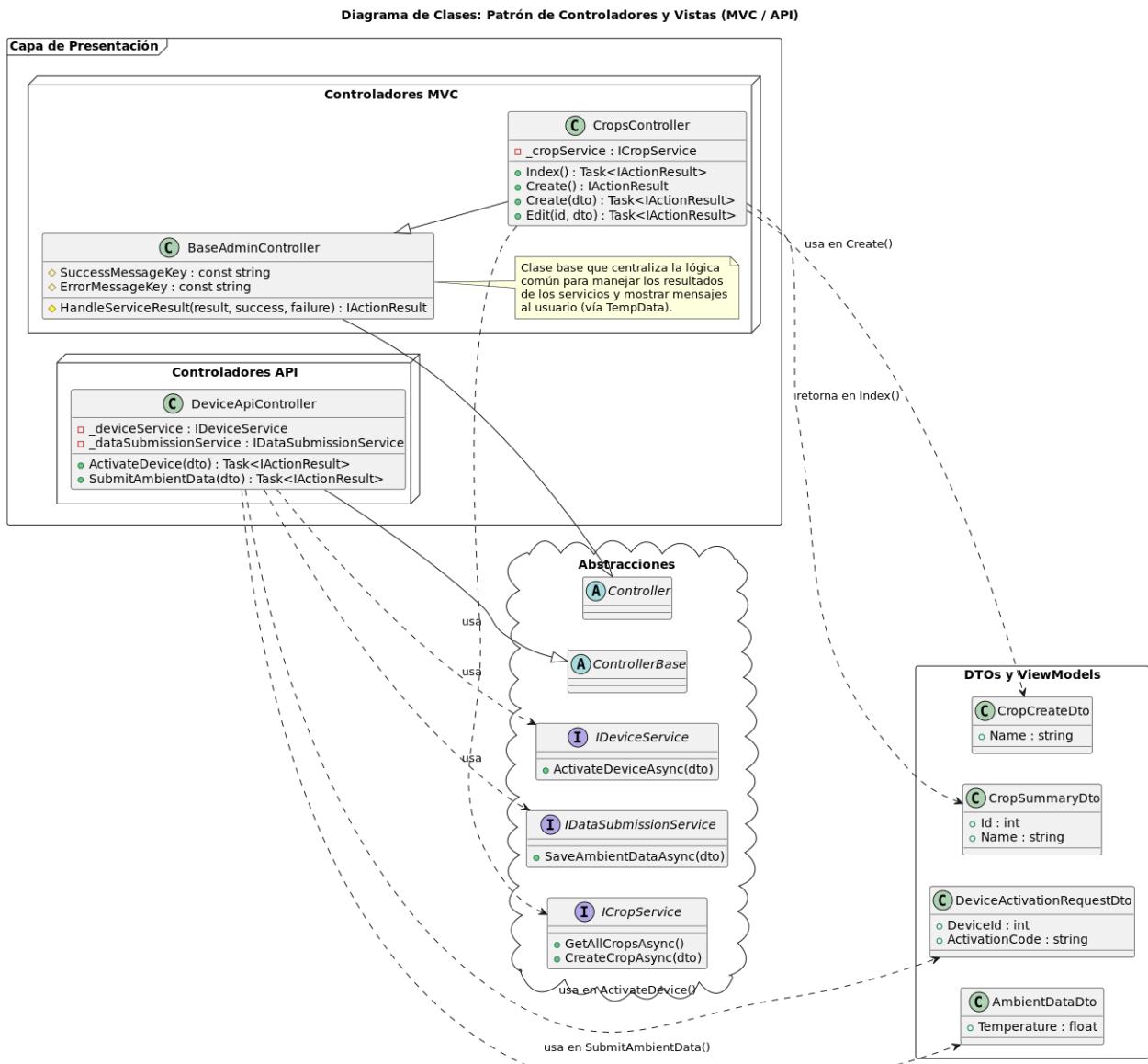
- **UserAuditingMiddleware:** Es un componente de middleware que se ejecuta en cada petición. Su función principal es extraer el identificador del usuario autenticado (si existe) y establecerlo como el `application_name` en la conexión de la base de datos (`ApplicationDbContext`). Esto permite una auditoría detallada a nivel de base de datos para rastrear qué usuario realizó cada operación.

- **DeviceAuthenticationHandler**: Es un manejador de autenticación personalizado que hereda de **AuthenticationHandler**. Se activa específicamente para los endpoints de la API de dispositivos protegidos con la política "DeviceAuthenticated". Utiliza el **IDeviceService** para validar el token de acceso (**AccessToken**) enviado en el encabezado de autorización y, si es válido, construye la identidad (**ClaimsPrincipal**) del dispositivo.
- **ValidateTurnstileAttribute**: Es un filtro de acción (**ActionFilterAttribute**) que se aplica como un atributo (**[ValidateTurnstile]**) a las acciones de los controladores que manejan envíos de formularios públicos. Antes de que se ejecute la acción, este filtro extrae el token de Cloudflare Turnstile de la petición y utiliza el **ITurnstileService** para verificar su validez, previniendo así ataques automatizados por bots.

Este diagrama muestra cómo estas clases interceptan las solicitudes en diferentes etapas del pipeline de ASP.NET Core (Middleware, Autenticación, Filtro de Acción) para aplicar lógica transversal de seguridad y auditoría. Se visualizan también sus dependencias clave con servicios de la capa de aplicación y el contexto de la base de datos.

**Figura 78**

Diagrama de Clases: Patrón de Controladores y Vistas (MVC / API).



Finalmente, la Figura 78 describe el patrón arquitectónico seguido por los controladores en la capa de Presentación. En lugar de mostrar cada controlador individualmente, este diagrama utiliza ejemplos representativos para ilustrar la estructura general.

- **Controladores MVC:** Se muestra la clase base `BaseAdminController`, que hereda de la clase `Controller` de ASP.NET Core. Esta clase base centraliza lógica común para todos los controladores del área de administración, como el manejo estandarizado de los resultados de los servicios (`HandleServiceResult`) y la comunicación de mensajes al usuario a través de `TempData`. Un controlador típico como `CropsController` hereda de `BaseAdminController` y depende de la interfaz del servicio correspondiente (`ICropService`) para realizar las operaciones. Utiliza DTOs como `CropCreateDto` para recibir datos de los formularios y `CropSummaryDto` (o `ViewModels`) para pasar datos a las vistas.
- **Controladores API:** Se representa con `DeviceApiController`, que hereda de  `ControllerBase`. Estos controladores están diseñados para ser consumidos por clientes programáticos (como el hardware). Dependen de las interfaces de servicio (`IDeviceService`, `IDataSubmissionService`) y utilizan DTOs específicos de la API (como `DeviceActivationRequestDto` o `AmbientDataDto`) para definir los contratos de datos de los endpoints.
- **Abstracciones y Dependencias:** El diagrama resalta cómo los controladores dependen de las interfaces de los servicios definidos en la capa de aplicación, respetando el principio de inversión de dependencias y manteniendo el acoplamiento bajo. También muestra cómo los DTOs actúan como la interfaz de datos entre la capa de presentación y la capa de aplicación.

Este patrón asegura que los controladores sean ligeros, centrados en manejar las peticiones HTTP y orquestar las llamadas a la lógica de negocio, manteniendo una clara separación de responsabilidades dentro de la arquitectura.

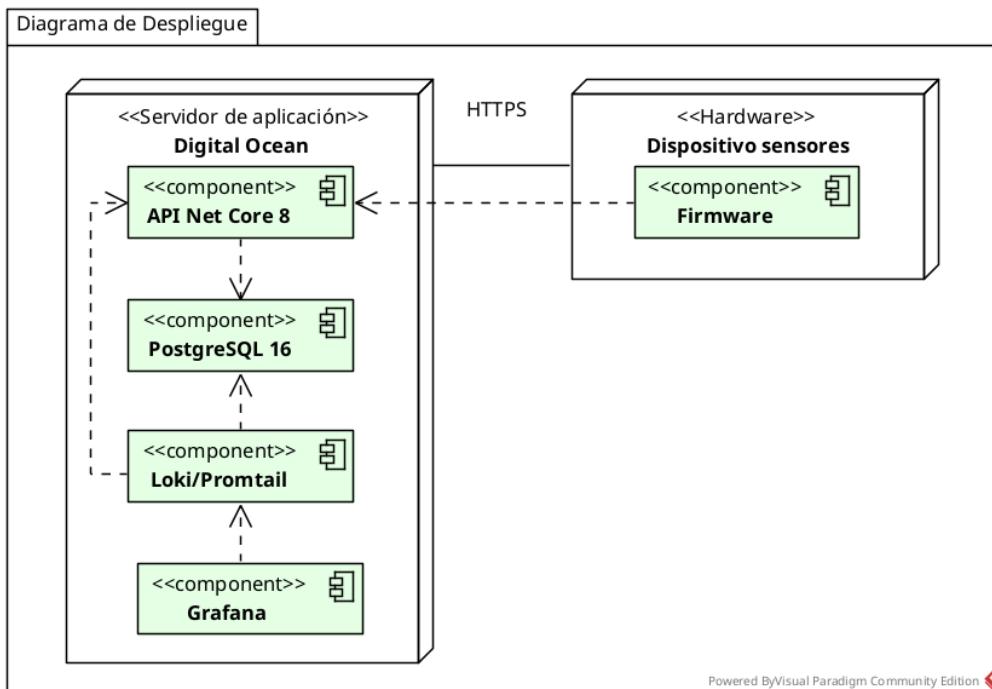
#### 2.4.6. Diagrama de Despliegue

La vista de despliegue muestra la disposición física de los nodos, que son recursos computacionales de tiempo de ejecución, como computadoras u otros dispositivos (Rumbaugh y cols., 2007).

Durante la ejecución, los nodos pueden contener artefactos, que son entidades físicas como archivos (Rumbaugh y cols., 2007).

**Figura 79**

*Diagrama de Despliegue del Sistema.*



El Diagrama de Despliegue, mostrado en la Figura 79, representa la arquitectura física del sistema y cómo sus componentes de software se distribuyen en diferentes nodos de hardware y servidores. Se identifican dos nodos principales:

- «Servidor de aplicación» Digital Ocean: Representa el nodo principal del servidor que aloja la aplicación. Este servidor contiene un conjunto de componentes de software que operan de forma integrada mediante Docker Compose:
  - API Net Core 8: Es el componente de aplicativo que gestiona la lógica de negocio y provee las vistas al usuario.

- PostgreSQL 16: El sistema gestor de base de datos donde se almacenan los datos. Contiene PgAudit para proveer la auditoria de la base de datos al sistema de Logging.
  - Loki/Promtail: Componentes destinados a la recopilación y gestión de logs.
  - Grafana: Herramienta de visualización y monitoreo que consume los datos de Loki/Promtail.
- «Hardware» Dispositivo sensores: Representa el dispositivo físico encargado de la toma de datos y ejecuta su propio componente de Firmware.

La comunicación entre el Dispositivo sensores (específicamente su Firmware) y la API Net Core 8 se establece a través del protocolo seguro HTTPS.

Internamente, dentro del servidor Digital Ocean, el diagrama ilustra las dependencias: la API interactúa con la base de datos PostgreSQL y, junto con esta, envía información (logs) al sistema Loki/Promtail, el cual a su vez alimenta a Grafana para la visualización.

## 2.5. Diseño de los Casos de Prueba

Texto sobre el diseño de casos de prueba utilizando SonarQube.

## 2.6. Estimación de Recursos

La estimación del esfuerzo y los recursos necesarios para el desarrollo y mantenimiento del sistema *Arandano IRT* es fundamental para comprender la magnitud del proyecto. Dada la disponibilidad de una definición detallada de los casos de uso funcionales, se seleccionó el método de Puntos de Casos de Uso (UCP - Use Case Points) (Karner, 1993) para cuantificar el tamaño funcional del software y derivar una estimación del esfuerzo requerido. Este método proporciona una estimación basada en la complejidad de las interacciones de los actores con el sistema y la com-

plejidad intrínseca de las funcionalidades ofrecidas, ajustada por factores técnicos y ambientales del proyecto.

### **2.6.1. Metodología de Puntos de Casos de Uso (UCP)**

El método UCP, propuesto por Gustav Karner, sigue un proceso estructurado en varios pasos:

1. **Calcular el Peso No Ajustado de los Actores (UAW - Unadjusted Actor Weight):** Se identifican los actores del sistema y se clasifican según su complejidad (Simple, Promedio, Complejo), asignando un peso a cada uno. La suma ponderada de los actores constituye el UAW.
2. **Calcular el Peso No Ajustado de los Casos de Uso (UUCW - Unadjusted Use Case Weight):** Se identifican los casos de uso funcionales y se clasifican por complejidad (Simple, Promedio, Complejo) basándose en el número de transacciones o pasos significativos. La suma ponderada de los casos de uso da como resultado el UUCW.
3. **Calcular los Puntos de Casos de Uso No Ajustados (UUCP - Unadjusted Use Case Points):** Se obtiene sumando el UAW y el UUCW:  $UUCP = UAW + UUCW$ .
4. **Determinar el Factor de Complejidad Técnica (TCF - Technical Complexity Factor):** Se evalúa la influencia de 13 factores técnicos estándar (T1-T13) en una escala de 0 (irrelevante) a 5 (esencial). Se calcula el factor técnico  $TF = \sum_{i=1}^{13} (Calificacion_i \times Peso_i)$  y luego  $TCF = 0,6 + (0,01 \times TF)$ .
5. **Determinar el Factor de Complejidad Ambiental (ECF - Environmental Complexity Factor):** Se evalúa la influencia de 8 factores ambientales estándar (E1-E8) relacionados con el equipo y el entorno del proyecto, en una escala de 0 a 5. Se calcula el factor ambiental  $EF = \sum_{i=1}^8 (Calificacion_i \times Peso_i)$  y luego  $ECF = 1,4 + (-0,03 \times EF)$ .

6. **Calcular los Puntos de Casos de Uso Ajustados (UCP o AUCP):** Se ajustan los puntos no ajustados utilizando los factores de complejidad:  $UCP = UUCP \times TCF \times ECF$ .
7. **Estimar el Esfuerzo Total:** Se multiplica el valor UCP por un factor de productividad (PF - Productivity Factor), que representa las horas-persona requeridas por cada UCP.  
 $Esfuerzo(horas) = UCP \times PF$ .

### 2.6.2. Aplicación del Método UCP al Proyecto

A continuación, se aplican los pasos del método UCP utilizando las clasificaciones y calificaciones proporcionadas, basadas en los casos de uso descritos en la Sección 2.4.2 y el conocimiento detallado del sistema.

#### Paso 1 y 2: Cálculo de UAW y UUCW

Se identificaron y clasificaron los actores y casos de uso del sistema *Arandano IRT*. El actor ‘Sistema’ y el ‘Sistema de análisis’ interno no se ponderan como actores externos según la metodología estándar. Las API externas consumidas (Cloudflare Turnstile, WeatherAPI, Brevo) se consideran en el factor T12.

**Tabla 13**

*Cálculo del Peso No Ajustado de los Actores (UAW).*

Actor	Descripción	Clasificación	Peso	Total
Persona (Usuario/Admin)	Humano interactuando vía GUI	Complejo	3	3
Dispositivo IoT	Sistema externo vía API	Simple	1	1
<b>Total UAW: 4</b>				

**Tabla 14**

*Cálculo del Peso No Ajustado de los Casos de Uso (UUCW).*

Clasificación	Peso	Cantidad	Total
Simple	5	14	70
Promedio	10	14	140
Complejo	15	6	90
<b>Total UUCW</b>			<b>300</b>

Nota: Se identificaron 36 casos de uso funcionales, incluyendo los de la API del dispositivo, clasificados según su número estimado de transacciones.

### **Paso 3: Cálculo de UUCP**

Los Puntos de Casos de Uso No Ajustados son:  $UUCP = UAW + UUCW = 4 + 300 = \mathbf{304}$

### **Paso 4: Cálculo del TCF**

Se calificaron los 13 factores técnicos según su impacto en el proyecto.

**Tabla 15***Cálculo del Factor de Complejidad Técnica (TCF).*

<b>ID</b>	<b>Factor Técnico</b>	<b>Peso</b>	<b>Calificación</b>	<b>Resultado</b>
T1	Sistema distribuido	2	1	2,0
T2	Rendimiento	1	4	4,0
T3	Eficiencia del usuario final	1	4	4,0
T4	Complejidad del proc. interno	1	5	5,0
T5	Reutilización de código	1	4	4,0
T6	Facilidad de instalación	0.5	5	2,5
T7	Facilidad de uso	0.5	4	2,0
T8	Portabilidad	2	3	6,0
T9	Facilidad de cambio	1	4	4,0
T10	Concurrencia	1	4	4,0
T11	Características de seguridad	1	3	3,0
T12	Acceso a sistemas de terceros	1	3	3,0
T13	Facilidad para formación	1	2	2,0
<b>Total Factor Técnico (TF)</b>				<b>45,5</b>
<b>Total Factor Técnico (TF)</b>				<b>45,5</b>

Nota: Se utilizaron los pesos estándar para cada factor T.

**Paso 5: Cálculo del ECF**

Se calificaron los 8 factores ambientales que influyeron en el desarrollo del proyecto.

**Tabla 16***Cálculo del Factor de Complejidad Ambiental (ECF).*

<b>ID</b>	<b>Factor Ambiental</b>	<b>Peso</b>	<b>Calificación</b>	<b>Resultado</b>
E1	Familiaridad con proceso (Agile)	1.5	5	7,5
E2	Experiencia en la aplicación	0.5	2	1,0
E3	Experiencia en OO (C#)	1	4	4,0
E4	Capacidad del analista principal	0.5	4	2,0
E5	Motivación del equipo	1	5	5,0
E6	Estabilidad de requerimientos	2	5	10,0
E7	Personal a tiempo parcial	-1	3	-3,0
E8	Dificultad del lenguaje de prog.	-1	3	-3,0
E8	Dificultad del lenguaje de prog.	-1	3	-3,0
<b>Total Factor Ambiental (EF)</b>				<b>23,5</b>

Nota: Se utilizaron los pesos estándar para cada factor E.

**Paso 6: Cálculo de UCP**Los Puntos de Casos de Uso Ajustados son:  $UCP = UUCP \times TCF \times ECF = 304 \times 1,055 \times 0,695$ 

$$UCP = 320,72 \times 0,695 \approx 222,9 \approx 223$$

**2.6.3. Estimación de Esfuerzo**

Utilizando el valor UCP calculado y ajustando el Factor de Productividad (PF) a **15 horas-persona por UCP** para reflejar de manera más realista la eficiencia de un equipo de desarrollo académico ágil y dedicado, el esfuerzo total estimado para el desarrollo del sistema es:

$$Esfuerzo = UCP \times PF = 223 \times 15 = **3,345 horas-persona.**$$

Esta cifra representa una estimación ajustada del tiempo total de desarrollo invertido por el equipo en análisis, diseño, implementación, pruebas y documentación del software, alineándose estrechamente con el esfuerzo real percibido durante los 10 meses del proyecto.

#### **2.6.4. Estimación de Costos**

Basado en el esfuerzo ajustado y los costos de infraestructura identificados, se presenta un resumen de los costos asociados al proyecto. Se utiliza una tarifa horaria estimada de \$15,000 COP para reflejar el contexto académico del desarrollo.

- **Costo de Desarrollo:**  $3,345 \text{ horas} \times 15,000 \text{ COP/hora} = \mathbf{50,175,000 \text{ COP}}$  (Estimado)
- **Costo Anual de Infraestructura:**
  - VM DigitalOcean (Plan \$14 USD/mes con aprox. 4000 COP/USD): \$672,000 COP
  - Registro de Dominio ('.co', estimado): \$80,000 COP
  - Servicios Externos (Brevo, Cloudflare): \$0 COP (Capas gratuitas)
  - **Total Infraestructura Anual: \$752,000 COP**
- **Costo Anual Estimado de Mantenimiento:**
  - Esfuerzo de Mantenimiento (15 % del esfuerzo de desarrollo):  $3,345 \times 0,15 \approx 502 \text{ horas}$
  - Costo Esfuerzo Mantenimiento:  $502 \text{ horas} \times 15,000 \text{ COP/hora} = \$7,530,000 \text{ COP}$
  - Costo Infraestructura Anual: \$752,000 COP
  - **Total Mantenimiento Anual Estimado: \$8,282,000 COP**

La Tabla 17 resume estos costos estimados ajustados.

**Tabla 17**

*Resumen de Costos Estimados del Proyecto (COP) - Ajustado.*

Componente de Costo	Valor Estimado (COP)
Costo Único de Desarrollo	50,175,000
Costo Anual de Infraestructura	752,000
Costo Anual de Mantenimiento (Esfuerzo + Infra.)	8,282,000

Nota: La tarifa horaria y el costo del dominio son estimaciones. El PF se ajustó a 15 h/UCP. Los costos de infraestructura pueden variar.

Esta estimación ajustada proporciona una visión cuantitativa de los recursos invertidos en el desarrollo inicial y los costos recurrentes esperados para la operación y mantenimiento del sistema *Arandano IRT*, reflejando de forma más cercana la realidad del proyecto académico.

## 2.7. Resultados de la Implementación del Software

La implementación del software *Arandano IRT* culminó con el despliegue exitoso de un sistema funcional y robusto, capaz de cumplir con los requerimientos definidos para el monitoreo del estrés hídrico en plantas de arándano Biloxi mediante termografía de bajo costo. Los resultados de esta fase abarcan tanto el producto de software final como las lecciones aprendidas durante el proceso de desarrollo e implementación.

Un aspecto fundamental del proceso fue la adopción de un enfoque iterativo iniciando con un Prototipo Mínimo Viable (MVP). Esta estrategia demostró ser altamente beneficiosa, permitiendo la validación temprana de las tecnologías seleccionadas (ASP.NET Core, PostgreSQL), la arquitectura MVC propuesta y las funcionalidades críticas de recolección y visualización de datos. El MVP no solo proporcionó una base sólida sobre la cual construir la versión final, sino que también facilitó

la generación de un conjunto de datos inicial superior a 3,000 registros, esencial para las fases posteriores de análisis y experimentación. La experiencia con el MVP reafirmó la recomendación de priorizar la funcionalidad central sobre aspectos secundarios como el diseño detallado de la interfaz en las etapas iniciales de proyectos de naturaleza similar.

La arquitectura monolítica modular, basada en el patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC) con ASP.NET Core 8, resultó adecuada para el alcance del proyecto. Permitió una organización lógica del código mediante una organización de carpetas basadas en la arquitectura cebolla (Presentación, Controladores, Aplicación, Dominio, Infraestructura), facilitando el desarrollo y mantenimiento por parte del equipo. La separación de responsabilidades inherente al patrón, gestionada mediante inyección de dependencias, contribuyó a la cohesión y bajo acoplamiento del código fuente.

En cuanto a la infraestructura, la decisión de implementar una pila tecnológica auto-hospedada y contenerizada con Docker sobre una máquina virtual en DigitalOcean demostró ser acertada. Esta elección fue motivada por un incidente durante la fase del MVP, donde una falla en un servicio externo (Cloudflare) provocó una interrupción prolongada, impidiendo la recolección de datos críticos. La arquitectura final, que minimiza las dependencias externas para las funciones esenciales y utiliza componentes como Caddy, MinIO, Loki y Grafana gestionados vía Docker Compose, ha exhibido una alta disponibilidad, manteniendo un tiempo de actividad del 100 % durante más de 100 días consecutivos de operación continua. Este resultado valida la robustez de la infraestructura implementada y su idoneidad para un sistema de monitoreo.

Funcionalmente, el software implementado cubre todos los casos de uso definidos (Sección 2.4.2), incluyendo la gestión de usuarios basada en ASP.NET Core Identity con un sistema de invitaciones, la administración de cultivos, plantas y dispositivos, la recepción de datos ambientales y térmicos desde el hardware, el registro de observaciones cualitativas, el procesamiento de datos para calcular el índice CWSI, la generación de reportes en PDF y un sistema de notificaciones automatizadas. La interfaz de usuario, desarrollada con Blazor/Razor, proporciona las herramientas

necesarias para que los usuarios administren y consulten la información del sistema de manera efectiva.

Finalmente, la estimación de recursos mediante el método de Puntos de Casos de Uso (UCP), ajustada con un factor de productividad de 15 horas/UCP, arrojó un esfuerzo total de 3,345 horas-persona (Sección 2.6). Esta cifra, derivada de un análisis formal de la complejidad funcional, técnica y ambiental, se alinea de manera realista con el tiempo invertido por el equipo de dos desarrolladores durante los 10 meses del proyecto, proporcionando una medida cuantitativa del trabajo realizado.

Por lo que la implementación del software *Arandano IRT* no solo entregó una herramienta funcional y técnicamente sólida, sino que también validó las decisiones arquitectónicas y metodológicas tomadas, resultando en un sistema estable y adaptado a las necesidades del monitoreo de estrés hídrico en el contexto del proyecto.

# **III. DOCUMENTACIÓN HARDWARE**

## **3.1. Introducción**

En este capítulo se presenta la importancia del hardware en el sistema de detección temprana de *Botrytis cinerea*, justificando la selección de cada componente y su contribución al funcionamiento global del sistema.

## **3.2. Objetivos**

- Describir los componentes seleccionados para el sistema de detección.
- Detallar la metodología utilizada para la caracterización y validación de cada componente.
- Presentar los resultados obtenidos en la integración del hardware y su rendimiento en condiciones experimentales.

## **3.3. Descripción de Componentes**

### **3.3.1. Microcontrolador ESP32-S3-WROOM-1 N16R8**

Descripción del microcontrolador y sus características principales.

### **3.3.2. Cámara termográfica MLX90640**

Descripción del sensor de termografía, sus especificaciones y función en la detección.

### **3.3.3. Sensor de luz BH1750**

Detalle del sensor de luminosidad y su relevancia en el monitoreo ambiental.

### **3.3.4. Sensor de humedad y temperatura DHT22**

Explicación del sensor de temperatura y humedad, resaltando su precisión y rango de medición.

### **3.3.5. Cámara RGB OV2640**

Breve descripción de la cámara adicional y sus aplicaciones en el proyecto.

### **3.3.6. Regulador de voltaje LM2596**

Descripción del regulador de voltaje y su importancia para garantizar la estabilidad del sistema.

## **3.4. Metodología de Caracterización**

Esta sección describe el proceso sistemático para evaluar y validar el desempeño de cada componente y su integración en el sistema final.

### **3.4.1. Evaluación y verificación de componentes**

- **Definición de Parámetros de Evaluación:** Establecer los parámetros (por ejemplo, precisión, tiempo de respuesta y estabilidad) a medir para cada sensor y módulo.

- **Diseño de Protocolos de Prueba:** Elaborar procedimientos detallados para realizar pruebas de calibración y verificación en condiciones controladas.
- **Implementación de Ensayos Experimentales:** Ejecutar las pruebas en laboratorio, documentando condiciones ambientales, configuraciones y resultados obtenidos.
- **Análisis de Resultados:** Comparar los datos obtenidos con las especificaciones del fabricante y los requerimientos del proyecto.

### **3.4.2. Configuración e Integración del Firmware**

- **Diseño del Esquema de Integración:** Elaborar diagramas que muestren la conexión física entre el ESP32 y cada componente, indicando rutas de comunicación (I2C, SPI, etc.).
- **Configuración en Platform.io IDE:** Documentar el proceso de configuración, instalación de librerías, asignación de pines y gestión de interrupciones o tiempos de muestreo.
- **Pruebas de Integración:** Realizar pruebas para verificar la comunicación y correcta transmisión de datos entre el hardware y el firmware.
- **Documentación de la Integración:** Registrar todos los pasos y resultados obtenidos para facilitar futuras revisiones o ajustes.

### **3.4.3. Validación y Análisis de Resultados**

En esta sección se evalúa el rendimiento global del sistema integrado mediante la comparación de datos experimentales controlados con los objetivos del proyecto. Se presentan datos, gráficos y análisis que demuestran el desempeño de cada componente y del sistema en conjunto, contrastándolos con los parámetros de referencia y registrando hallazgos para futuras revisiones.

### **3.5. Implementación del Sistema Integrado**

Se describe la implementación práctica, incluyendo la integración final del hardware con el firmware, la calibración de sensores y la ejecución de pruebas en condiciones reales para ajustar y optimizar el sistema.

### **3.6. Resultados**

Interpretación de los resultados finales obtenidos, identificando fortalezas y áreas de mejora, y estableciendo la relación entre el rendimiento del hardware y los objetivos del proyecto.

## IV. ESTUDIO EXPERIMENTAL

### Nota Preliminar

Durante el desarrollo del presente proyecto de investigación, se presentó un cambio en el enfoque inicial del estudio. Originalmente, la propuesta contemplaba el desarrollo de un **aplicativo web para la detección temprana de *Botrytis cinerea*** en cultivos de arándano (*Vaccinium corymbosum* variedad Biloxi). Con el propósito de obtener muestras biológicas del hongo, se estableció contacto con diferentes instituciones nacionales, entre ellas **AGROSAVIA** y diversas universidades del país. Sin embargo, no fue posible conseguir un aislamiento viable del patógeno ni una especie alternativa que infectara específicamente al arándano Biloxi.

Debido a estas limitaciones experimentales y considerando el crecimiento técnico que alcanzó el aplicativo web en sus primeras etapas de desarrollo, se decidió redirigir el objetivo del proyecto hacia la implementación de un **sistema de detección de estrés hídrico**, manteniendo la base tecnológica desarrollada y orientando los esfuerzos a un problema de relevancia agronómica equivalente. Este ajuste permitió continuar con la validación del sistema de adquisición de datos, el procesamiento térmico y el análisis del índice de estrés hídrico (CWSI), conservando la coherencia metodológica del trabajo.

**Recomendación para futuras investigaciones.** Para investigaciones posteriores que busquen abor-

dar el estudio de patógenos específicos en cultivos agrícolas, se recomienda priorizar la **obtención y verificación del agente causal** (hongo, patógeno o cepa) como una tarea preliminar o requisito previo antes de definir los objetivos experimentales o tecnológicos del proyecto. De esta manera, se garantiza la viabilidad biológica del estudio y se optimizan los recursos destinados al desarrollo de herramientas de diagnóstico o detección temprana.

## 4.1. Introducción

La agricultura moderna busca producir más alimentos de forma sostenible, adoptando prácticas que optimicen el uso del recurso hídrico (Laveglia y cols., 2024; Vargas Q. y Best S., 2021). Una estrategia fundamental para lograrlo es la agricultura de precisión que mide y responde a la variabilidad de los cultivos para mejorar su manejo (Dong y cols., 2024; Pineda y cols., 2021). Pero la implementación de técnicas avanzadas como la termografía infrarroja (en adelante IRT), un método no invasivo y eficaz para detectar estrés hídrico a través de la temperatura foliar (García Tejero y cols., 2015; Pineda y cols., 2021), ha sido limitada por el alto costo de los equipos comerciales (Dong y cols., 2024; Salgado Vargas y cols., 2018). Por lo tanto, existe una brecha tecnológica que frena su adopción, haciendo necesario el desarrollo de herramientas de monitoreo asequibles que democratizan el acceso a estas tecnologías.

En este escenario, el arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) se destaca como la cuarta frutilla de mayor importancia económica a nivel mundial (Salgado Vargas y cols., 2018). En el altiplano cundiboyacense, la variedad Biloxi está en expansión (Quintana Reina, 2020), aunque su sistema radicular superficial y poco eficiente la hace altamente vulnerable al déficit hídrico, afectando crecimiento, calibre de frutos y rendimiento (Morales, 2017; Almutairi y cols., 2021).

Cuando las plantas enfrentan déficit de agua, cierran estomas, reducen la transpiración y elevan su temperatura foliar, un indicador temprano del estrés hídrico (García Tejero y cols., 2015; Kappes

y Balbi, 2024; Vieira y Ferrarezi, 2021). La IRT permite detectar este fenómeno al registrar la radiación térmica de la planta y, mediante el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI por sus siglas en inglés), cuantificar el nivel de afectación (Aux y cols., 2022; Jiménez y Mayorga, 2021).

Recientes avances en hardware accesible han demostrado ser una alternativa prometedora para monitorear la temperatura foliar con suficiente precisión (Dong y cols., 2024). En este contexto, la implementación de una prueba de concepto (PoC) se presenta como un paso metodológico crucial. Esta prueba se define como un estudio a escala reducida diseñado para demostrar la funcionalidad de una tecnología y verificar la factibilidad de un concepto antes de su desarrollo a gran escala (Battaglia, Paolucci, y Ughetto, 2021).

Por esto, considerando la susceptibilidad del arándano Biloxi al estrés hídrico, este estudio se plantea como realizar una prueba de concepto orientada a desarrollar un sistema de termografía de bajo costo para la detección temprana de estrés hídrico. El objetivo es demostrar la sensibilidad del sistema para registrar cambios térmicos que sean plausibles y coherentes con el estado hídrico de la planta, aportando así una base inicial para futuros estudios agronómicos a mayor escala.

## 4.2. Materiales y Métodos

### 4.2.1. Planteamiento Metodológico

Este estudio se diseñó como una prueba de concepto (PoC) para evaluar un sistema de monitoreo de bajo costo (Battaglia y cols., 2021; Pineda y cols., 2021). Para ello, se empleó un diseño de caso único ( $n = 1$ ) con una planta de arándano (var. Biloxi) de 18 meses en un microinvernadero (120 × 50 × 50 cm) en Madrid, Cundinamarca, Colombia, durante 55 días.

El objetivo fue determinar si el sistema era lo suficientemente sensible para detectar los cambios térmicos esperados durante un ciclo de estrés-recuperación, utilizando la planta como su propio

control. Este diseño es coherente con el enfoque de PoC, cuyo propósito es establecer la viabilidad funcional del sistema antes de su implementación en estudios con diseños estadísticos más complejos (Battaglia y cols., 2021; Pineda y cols., 2021). Además, se realizaron observaciones cualitativas del vigor de la planta (turgencia de hojas) para contextualizar los datos cuantitativos (Salgado Vargas y cols., 2018; Yu, Rho, Kim, y Lee, 2015; Almutairi y cols., 2021).

### 4.3. Diseño Experimental

El experimento se diseñó como una prueba de concepto para evaluar la capacidad del sistema en el monitoreo de un solo individuo de arándano (var. Biloxi).

**Sujeto Experimental:** Se utilizó una planta de arándano de la variedad Biloxi, de 18 meses de edad, una de las más cultivadas en la región (Quintana Reina, 2020). La planta se mantuvo en un microinvernadero ( $120 \times 50 \times 50$  cm) para controlar las condiciones ambientales y aislarla de la lluvia.

**Ubicación y Duración:** El estudio se llevó a cabo durante 55 días consecutivos, entre agosto y octubre de 2024, en el municipio de Facatativá, Cundinamarca, Colombia.

**Tratamiento de Estrés Hídrico:** El experimento se dividió en tres fases secuenciales sobre la misma planta, utilizándola como su propio control:

1. **Fase de Estrés Hídrico Inducido:** Se suspendió completamente el riego con el fin de provocar un estado de estrés hídrico progresivo en la planta, permitiendo evaluar la sensibilidad del sistema ante la disminución del contenido de agua foliar.
2. **Fase de Recuperación:** Posteriormente, tras dos semanas de estrés inducido, se reanudó el riego de manera normal para analizar la capacidad de recuperación de la planta y la respuesta del sistema de monitoreo durante el restablecimiento hídrico.

El prototipo de hardware se instaló a una distancia fija de la planta, asegurando que el dosel foliar estuviera siempre dentro del campo de visión del sensor térmico MLX90640. Adicionalmente, se realizaron observaciones cualitativas periódicas del vigor de la planta (turgencia de hojas) para contextualizar los datos cuantitativos, siguiendo prácticas de evaluación agronómica (Salgado Vargas y cols., 2018; Yu y cols., 2015; Almutairi y cols., 2021).

## 4.4. Recolección y Análisis de Datos

El firmware del ESP32-S3 fue programado para capturar datos de todos los sensores a intervalos regulares de **20 minutos** durante los 55 días del experimento. En cada intervalo, se registraron y transmitieron en formato JSON al servidor los siguientes datos:

- Una matriz completa de  $32 \times 24$  (768) valores de temperatura del sensor térmico MLX90640.
- Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ) y Humedad relativa (%) del sensor DHT22.
- Iluminancia (lux) del sensor BH1750.
- Una imagen RGB de contexto capturada por la cámara de apoyo.

Estos datos fueron almacenados en la base de datos PostgreSQL para su posterior análisis.

El análisis de los datos se centró en la extracción de la temperatura foliar a partir de la matriz térmica y el cálculo del CWSI, siguiendo estos pasos:

1. **Reducción de Ruido y Segmentación Térmica:** Para cada registro temporal, se promediaron seis capturas térmicas consecutivas (tomadas en rápida sucesión por el firmware) para minimizar el ruido inherente al sensor MLX90640. Sobre la matriz promediada, se aplicó un algoritmo de segmentación espacial en Python para aislar los píxeles correspondientes

exclusivamente a la canopia foliar, descartando el fondo (suelo, maceta, estructura del invernadero). La temperatura foliar promedio ( $T_c$  o  $T_{\text{canopia}}$ ) se calculó únicamente a partir de estos píxeles segmentados, una práctica recomendada para mejorar la precisión (Quezada y cols., 2020; Vieira y Ferrarezi, 2021).

2. **Cálculo del Índice de Estrés Hídrico (CWSI):** Se utilizó la metodología empírica del CWSI, desarrollada originalmente por Idso et al. (Idso y cols., 1981), que normaliza la diferencia entre la temperatura del dosel ( $T_c$ ) y la temperatura del aire ( $T_a$ ) utilizando referencias teóricas para las temperaturas foliares en condiciones de máxima transpiración ( $T_{\text{wet}}$ ) y mínima transpiración ( $T_{\text{dry}}$ ). El índice se calculó utilizando la siguiente fórmula (Quezada y cols., 2020):

$$\text{CWSI} = \frac{(T_c - T_a) - (T_{\text{wet}} - T_a)}{(T_{\text{dry}} - T_a) - (T_{\text{wet}} - T_a)}$$

donde  $(T_{\text{wet}} - T_a)$  representa el límite inferior (enfriamiento máximo) y  $(T_{\text{dry}} - T_a)$  el límite superior (sin enfriamiento), ambos estimados a partir de modelos teóricos o líneas base empíricas (Quezada y cols., 2020; Aux y cols., 2022). En este estudio, se implementó un método de cálculo empírico con líneas base horarias para  $T_{\text{wet}}$  y  $T_{\text{dry}}$ , buscando mitigar las variaciones térmicas naturales entre el día y la noche. Un valor de CWSI cercano a 0 indica ausencia de estrés, mientras que un valor cercano a 1 indica estrés hídrico severo.

3. **Análisis de Tendencias y Correlación Ambiental:** Los datos de  $T_c$ ,  $\Delta T = T_c - T_a$ , y CWSI se graficaron a lo largo del tiempo para visualizar las tendencias durante las dos fases del experimento, (estrés y recuperación).

Para correlacionar el rendimiento del sistema con las condiciones ambientales, se utilizó la API externa *WeatherApi* para obtener la descripción climática textual (por ejemplo, “Soleado”,

“Lluvia moderada”) en cada intervalo de medición. Se excluyeron del análisis comparativo por clima aquellas condiciones con menos de diez registros. Adicionalmente, se calculó el Déficit de Presión de Vapor (VPD) a partir de los datos de temperatura y humedad del DHT22 para segmentar el análisis de  $\Delta T$  por demanda atmosférica.

En total, se analizaron 3682 registros térmicos válidos.

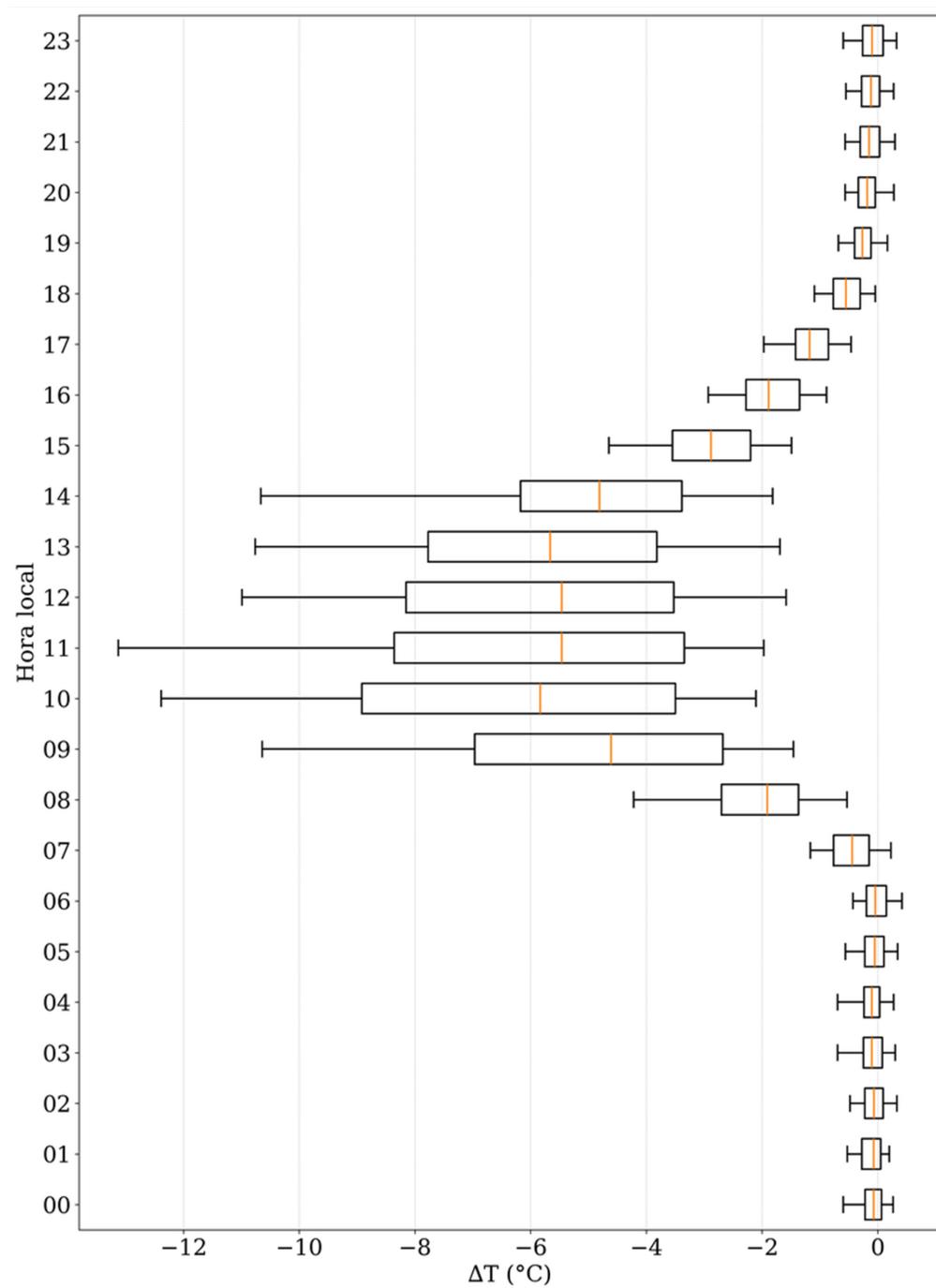
## 4.5. Resultados

Los resultados obtenidos con el sistema de monitoreo durante los 55 días permiten evaluar su capacidad para registrar la respuesta fisiológica de la planta de arándano (variedad Biloxi) ante el estrés hídrico inducido y su posterior recuperación.

La Figura 80 muestra la distribución de los valores de  $\Delta T$  (Estrés Térmico:  $T_{\text{canopia}} - T_{\text{aire}}$ ) capturados por el sistema a lo largo de las 24 horas del día, agrupando todos los datos del experimento. Se revela un patrón circadiano bien definido. Durante las horas nocturnas (aproximadamente 20:00 a 06:00), las mediciones de  $\Delta T$  se mantienen estables y muy cercanas a 0°C, con una variabilidad mínima. Este comportamiento es coherente con el hecho de que, sin la energía de la radiación solar, la actividad de transpiración es casi nula y la planta alcanza un equilibrio térmico con su entorno (García Tejero y cols., 2015).

**Figura 80**

*Distribución horaria del estrés térmico ( $\Delta T$ ). Los boxes muestran la mediana y los cuartiles, los bigotes el rango intercuartílico  $\times 1,5$ .*



En las horas fotosintéticamente activas, a partir de las 07:00, el sistema registra un marcado descenso en los valores de  $\Delta T$ , indicando el inicio de la transpiración y el consecuente enfriamiento foliar. Este proceso se intensifica a lo largo de la mañana, y las medianas de  $\Delta T$  alcanzan sus valores más negativos (por debajo de  $-5^{\circ}\text{C}$ ) entre las 10:00 y las 13:00. Este comportamiento es consistente con el enfriamiento por evaporación, mecanismo vital mediante el cual la planta disipa la carga térmica impuesta por la radiación solar (García Tejero y cols., 2015).

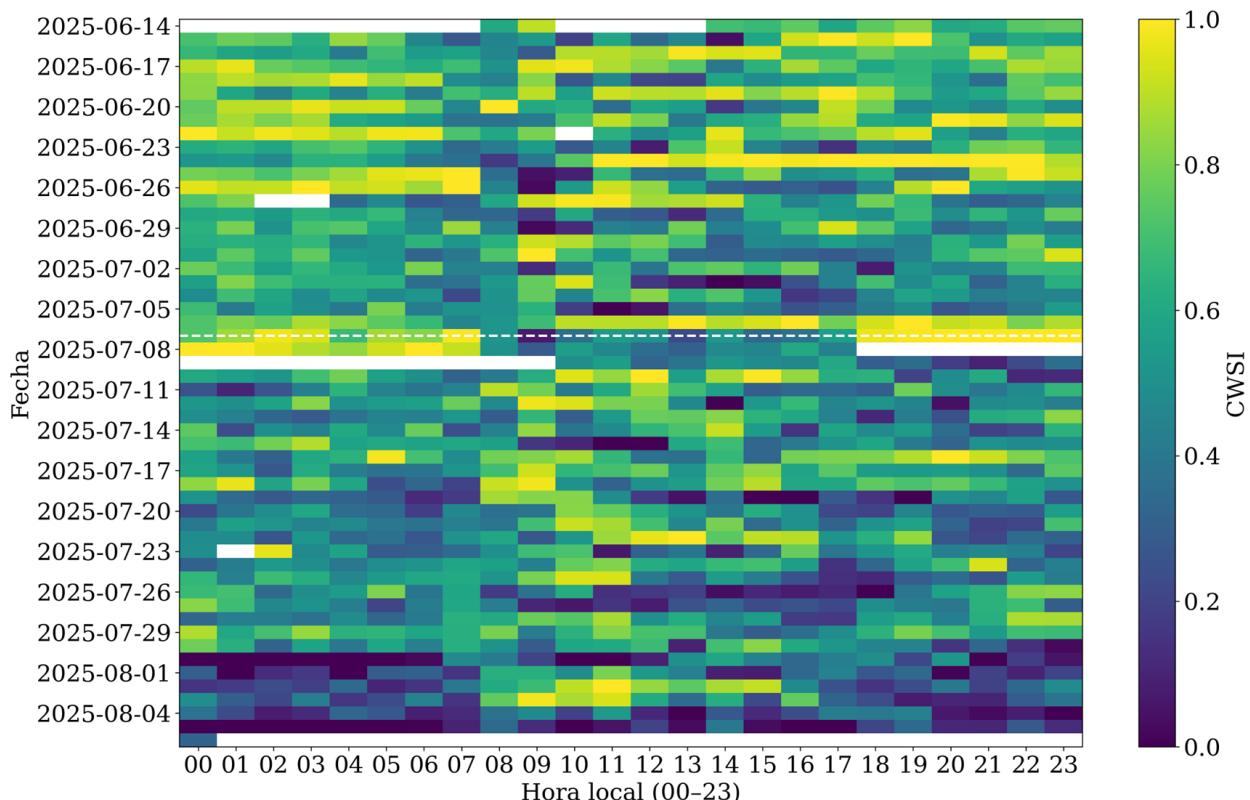
La característica más reveladora del gráfico es la **gran variabilidad** registrada durante este pico de actividad diurna (10:00-14:00), visible en la amplia dispersión de los datos (cajas y bigotes largos) y los valores extremos. Esta dispersión es crucial, ya que el gráfico agrupa los 55 días de datos, incluyendo tanto el periodo de estrés como el de recuperación. El valor mínimo registrado (aproximadamente  $-13^{\circ}\text{C}$ ) representa la máxima capacidad de enfriamiento de la planta en días soleados y con riego óptimo. En contraste, el extremo superior de las cajas y bigotes (más cercano a  $0^{\circ}\text{C}$ ) corresponde a los momentos en que la planta, bajo estrés hídrico severo, no podía transpirar eficazmente y su temperatura foliar se acercaba a la del aire. La **captura de este amplio rango dinámico** es la evidencia visual de que el sistema de bajo costo fue lo suficientemente sensible para registrar todo el espectro de respuestas fisiológicas de la planta, desde el riego óptimo hasta el estrés severo.

Si bien la captura de este rango valida la sensibilidad del sensor, un análisis más profundo requiere normalizar las mediciones para eliminar la influencia de las condiciones ambientales. Por ello, se utilizó el CWSI como métrica clave. La Figura 81 presenta un mapa de calor que visualiza la evolución diaria y horaria de este índice durante el experimento. Los colores cálidos (amarillo) indican un alto estrés ( $\text{CWSI} \approx 1$ ) detectado por el sistema, y los colores fríos (morado/azul), un bajo estrés ( $\text{CWSI} \approx 0$ ). La línea punteada horizontal señala el momento de la reanudación del riego (Día 46). Los puntos blancos indican datos faltantes por fallas técnicas menores.

**Figura 81**

Mapa horario del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI) durante los 55 días del experimento.

La línea punteada marca la reanudación del riego.



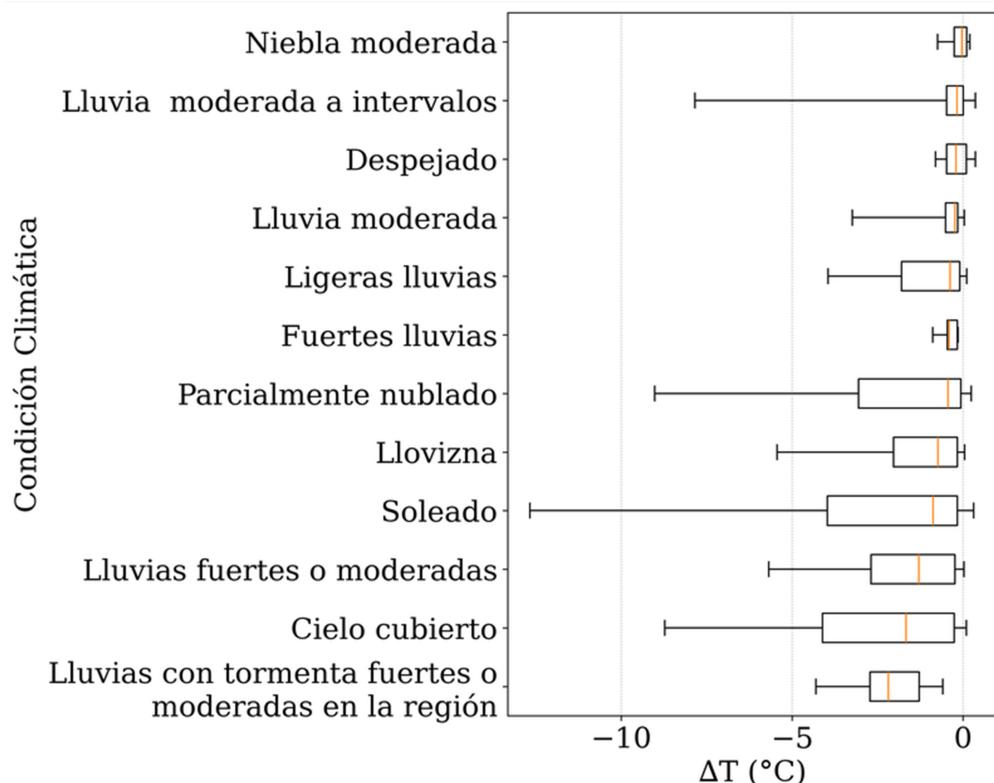
El mapa de calor demuestra claramente el funcionamiento del sistema. Durante el periodo de sequía inducida (antes de la línea punteada), el sistema registró consistentemente los valores más altos de CWSI (predominio de colores verdes/amarillos) durante las horas de máxima demanda atmosférica (aproximadamente 10:00-17:00). Tras la reanudación del riego (después de la línea punteada), se observa una **transición vertical abrupta** hacia colores fríos (morados/azules) en esas mismas horas, indicando una rápida recuperación del estado hídrico de la planta. Esta clara diferencia antes y después del riego valida la sensibilidad del sistema para detectar cambios en el

estado hídrico a lo largo del tiempo. El aumento del CWSI durante la sequía es consecuencia directa de la reducción de la transpiración por cierre estomático (Pineda y cols., 2021), mientras que el descenso post-riego refleja la reapertura estomática y la reanudación del enfriamiento (Yu y cols., 2015).

Adicionalmente, el sistema capturó interacciones complejas. Se observan algunas noches con CWSI elevado durante la fase de sequía, sugiriendo estrés acumulado. Inversamente, algunas tardes muestran CWSI bajo, probablemente por eventos climáticos (lluvia, nubosidad) que enfrían externamente la hoja, “enmascarando” temporalmente el estrés interno (Carolayn y Katherin, 2020). Dado que estas observaciones demuestran una fuerte dependencia entre las mediciones térmicas y el clima, se vuelve fundamental analizar esta relación. La Figura 82 compara la distribución de  $\Delta T$  bajo diferentes condiciones climáticas reportadas por la API externa.

**Figura 82**

*Distribución del estrés térmico ( $\Delta T$ ) segmentado por condición climática externa.*



El gráfico muestra dos comportamientos opuestos. En condiciones de alta humedad y baja radiación ("Niebla moderada", "Lluvia"), los valores de  $\Delta T$  se agrupan cerca de 0°C con mínima variabilidad, reflejando la limitación física de la transpiración en aire saturado. Por el contrario, en días de alta radiación ("Soleado", "Despejado"), el sistema registra la máxima capacidad de enfriamiento ( $\Delta T$  medianos  $< -5^{\circ}\text{C}$ , mínimos  $\approx -12^{\circ}\text{C}$ ) y la mayor variabilidad, que representa la diferencia entre la planta estresada y la bien regada bajo esas condiciones. Este gráfico (Figura 82) ilustra que las mediciones térmicas no pueden interpretarse aisladamente y valida la necesidad de usar índices normalizados como el CWSI o análisis segmentados por demanda atmosférica (VPD) (Pineda y cols., 2021).

Tras establecer la fuerte dependencia de las mediciones térmicas con el clima en la Figura 82, la Tabla 18 ofrece un análisis cuantitativo más riguroso. Esta presenta una comparación del  $\Delta T$  promedio medido por el sistema entre el periodo de “Estrés Hídrico” y el de “Recuperación”, segmentado por rangos equivalentes de Déficit de Presión de Vapor (VPD).

**Tabla 18**

*Comparación del estrés térmico ( $\Delta T$ ) bajo demandas atmosféricas equivalentes.*

Rango VPD (kPa)	Estrés Hídrico		Recuperación	
	$\Delta T$ Promedio (°C)	N Muestras	$\Delta T$ Promedio (°C)	N Muestras
[0.0, 0.5)	0.31	685	0.07	930
[0.5, 1.0)	-0.38	438	-0.46	432
[1.0, 1.5)	-1.89	174	-2.14	238
[1.5, 2.0)	-2.89	85	-3.25	139
[2.0, 2.5)	-4.16	61	-4.19	93
[2.5, 3.0)	-5.26	36	-5.20	51
[3.0, 3.5)	-6.55	22	-6.19	28
[3.5, 4.0)	-6.08	21	-6.83	33
[4.0, 4.5)	-7.20	22	-7.45	24
[4.5, 5.0)	-8.00	13	-7.75	17
[5.0, 5.5)	-8.41	4	-9.68	15
[5.5, 6.0)	-8.26	2	-9.11	12
[6.0, 6.5)	-9.89	4	-10.15	7
[6.5, 7.0)	-9.34	5	-11.15	3
[7.0, 7.5)	-10.44	1	-10.66	3
[7.5, 8.0)	N/A	N/A	-13.47	2
[8.0, 8.5)	N/A	N/A	-13.36	2
[8.5, 9.0)	N/A	N/A	-13.71	1

El análisis revela tres zonas de comportamiento que, en conjunto, validan la capacidad del sistema para detectar el estado hídrico:

- **Zona de Evidencia Consistente (VPD <2.5 kPa):** En condiciones de baja a moderada demanda atmosférica, donde se concentra la mayoría de las observaciones, los datos indican que el  $\Delta T$  promedio registrado en la planta estresada es sistemáticamente más alto (menos

negativo) que en la planta en recuperación. Esta diferencia, que es consistente con una menor capacidad de enfriamiento, refleja el principio básico de la termografía: el cierre estomático bajo estrés reduce la transpiración y eleva la temperatura foliar (García Tejero y cols., 2015).

- **Zona de Transición y Ruido Estadístico (VPD 2.5-5.0 kPa):** En este rango, las diferencias de  $\Delta T$  se reducen e incluso se invierten. Este comportamiento se atribuye a dos factores combinados: la escasa cantidad de muestras en esta franja (que aumenta la incertidumbre estadística) y los límites fisiológicos del arándano. Con una demanda atmosférica muy alta, incluso una planta bien regada puede tener dificultades para absorber agua a la misma velocidad que la transpira, debido a su sistema radicular superficial (Morales, 2017; Salgado Vargas y cols., 2018). Esto provoca que la respuesta térmica de la planta en ambas fases (estresada y en recuperación) converja, reduciendo la claridad de la señal en estas condiciones extremas y poco frecuentes.
- **Zona de Tendencia Sugerida (VPD >5.0 kPa):** En este rango extremo, los datos son escasos para establecer conclusiones definitivas, pero sugieren una tendencia interesante. Mientras la planta en recuperación alcanzó un enfriamiento máximo ( $\Delta T$  de hasta -13.71 °C), la ausencia de registros para la planta estresada en las condiciones más severas apunta a un posible cierre estomatal casi total como mecanismo de supervivencia para evitar la deshidratación (Yu y cols., 2015). Esto sugiere que es precisamente bajo esta alta exigencia donde la diferencia entre un estado hídrico saludable y uno deficiente se vuelve más pronunciada, destacando el potencial del sistema para detectar estrés severo.

Estos resultados cuantitativos, segmentados por VPD, refuerzan la validación de la sensibilidad del sistema para detectar diferencias en el estado hídrico bajo condiciones ambientales comparables.

# V. Resultados y Conclusiones Finales

Este capítulo final presenta una síntesis de los resultados obtenidos a lo largo del proyecto, ofreciendo una discusión crítica sobre el cumplimiento de los objetivos, las implicaciones de los hallazgos derivados tanto de la prueba de concepto funcional como de la caracterización del hardware, y las futuras líneas de investigación. Se busca dar una respuesta clara a la pregunta de investigación y consolidar el aporte de este trabajo al campo de la agricultura de precisión accesible.

## 5.1. Respuesta a la Pregunta de Investigación

La pregunta central fue: *¿Cómo se puede desarrollar un sistema que utilice hardware de bajo costo para la detección aproximada del estrés hídrico en plantas de arándano Biloxi mediante termografía?*

La respuesta, a la luz de los resultados obtenidos tanto en la caracterización del hardware como en la prueba de concepto experimental, es **afirmativa**. El desarrollo y la evaluación del sistema integrado han demostrado que es **factible construir, validar e implementar una solución tecnológica de bajo costo** capaz de monitorear indicadores fisiológicos asociados al estrés hídrico en arándano Biloxi.

- **Viabilidad y Fiabilidad Tecnológica:** Se diseñó, ensambló y caracterizó un prototipo de hardware funcional utilizando componentes asequibles (ESP32-S3, MLX90640, sensores

MEMS). La caracterización del sensor térmico nuevo ( $RMSE < 3,2^{\circ}C$ ) y los sensores ambientales MEMS demostró una precisión y estabilidad aceptables para aplicaciones agrícolas, confirmando que la barrera del alto costo de los equipos comerciales puede ser superada con una selección y validación adecuadas de componentes.

- **Detección Temprana y Sensibilidad:** El estudio experimental (PoC) evidenció que el sistema validado es suficientemente sensible para registrar los cambios en la temperatura foliar ( $T_c$ ,  $\Delta T$ ) y calcular el CWSI en respuesta a la restricción y reanudación del riego. La correlación observada entre el tratamiento hídrico y los indicadores térmicos ( $\Delta T$  más alto en estrés bajo VPD comparable, CWSI elevado en sequía y descendiendo post-riego) constituye una prueba empírica de que el sistema detecta la respuesta fisiológica antes de la aparición de síntomas visuales.

## 5.2. Discusión General

La termografía infrarroja (IRT) se consolida como una herramienta valiosa para la agricultura de precisión, facilitando el monitoreo no invasivo del estado hídrico y promoviendo un uso eficiente del agua (García Tejero y cols., 2015; Vieira y Ferrarezi, 2021; Pineda y cols., 2021; Hernanda y cols., 2024). Los resultados de este estudio, que abarcan tanto la caracterización del hardware como una prueba de concepto funcional, sugieren fuertemente que el sistema de bajo costo diseñado con el sensor MLX90640 y sensores ambientales MEMS tiene la capacidad de detectar cambios fisiológicos en arándano Biloxi mediante los indicadores  $\Delta T$  y CWSI (Dong y cols., 2024; Aux y cols., 2022; Erazo-Aux y cols., 2022).

Un hallazgo crucial provino de la **caracterización del hardware**: la evidencia cuantitativa del **impacto del desgaste** por uso intensivo en el rendimiento de los sensores de bajo costo. El prototipo 3, con componentes previamente utilizados, mostró un rendimiento inferior y sesgos

significativos (RMSE térmico > 20°C; RMSE ambiental > 4°C) comparado con los prototipos 1 y 2 equipados con componentes nuevos (RMSE térmico < 3,2°C). Esto subraya la importancia crítica de la calibración periódica y la selección cuidadosa de tecnologías (preferencia por MEMS sobre polímero capacitivo para ambientales) para garantizar la fiabilidad a largo plazo.

La **prueba de concepto funcional**, realizada con el hardware validado, demostró la sensibilidad del sistema *in vivo*. El patrón circadiano registrado en  $\Delta T$ , con enfriamiento diurno máximo entre 10:00-13:00, es coherente con el ciclo natural de transpiración. La alta variabilidad diurna capturada sugiere sensibilidad a las respuestas dinámicas entre estrés y recuperación. La rápida disminución del CWSI tras la reanudación del riego apunta a una recuperación fisiológica detectable.

El análisis por VPD fue fundamental, confirmando que el sistema detectó la reducción en la capacidad de enfriamiento bajo estrés ( $\Delta T$  más alto) en condiciones de baja a moderada demanda atmosférica (VPD < 2.5 kPa), consistente con el cierre estomático. Aunque el CWSI es un indicador normalizado, el estudio confirmó su sensibilidad a condiciones climáticas como lluvia/niebla, que pueden enmascarar el estrés. La integración de sensores ambientales y el cálculo de VPD permiten segmentar el análisis y aplicar filtros metodológicos para robustecer el diagnóstico.

### 5.2.1. Consecución de los Objetivos Planteados

El proyecto cumplió satisfactoriamente con los objetivos específicos planteados, los cuales se detallan a continuación junto con las acciones y resultados obtenidos para cada uno:

1. **Identificar y documentar los requisitos funcionales y no funcionales del sistema:** Se realizó un levantamiento de requisitos considerando las necesidades de adquisición, procesamiento y visualización de datos térmicos y ambientales. Esta fase permitió definir con claridad los componentes del sistema, sus interacciones y las condiciones necesarias para garantizar su correcto funcionamiento.

2. **Modelar la arquitectura del sistema mediante la creación de diagramas UML:** Se elaboró el modelado estructural y funcional del sistema mediante diagramas UML, representando los módulos principales y su flujo de información. Este modelado sirvió como guía para la integración posterior entre hardware, firmware y software.
3. **Integrar el hardware del módulo termográfico para la recolección de datos:** Se ensambló e integró el hardware compuesto por el sensor térmico MLX90640, sensores ambientales y una unidad de control basada en microcontrolador ESP32. Las pruebas experimentales demostraron estabilidad en la adquisición continua de datos, con márgenes de error aceptables (MAE y RMSE) en las mediciones térmicas y ambientales.
4. **Desarrollar el software que recolecte los datos del módulo termográfico para su posterior procesamiento:** Se implementó un sistema de software que incluye el firmware de adquisición, un servidor para almacenamiento y un aplicativo web para visualización y análisis. Este permitió la captura automática de datos, su organización en una base de datos y la presentación de indicadores como  $\Delta T = T_c - T_a$  y el índice CWSI.
5. **Evaluar la generación de un reporte de estado hídrico que diferencie entre plantas con riego óptimo y con déficit:** El software produjo un reporte de estado hídrico que resume las métricas clave y facilita la toma de decisiones. El informe incluye, entre otros elementos, el CWSI promedio, el CWSI máximo, conteo de alertas y anomalías, gráficos de evolución del índice y de temperaturas, y un resumen ejecutivo con recomendaciones de manejo (por ejemplo, revisar plan de riego y condiciones ambientales). Este reporte sirvió como evidencia práctica de la capacidad del sistema para sintetizar la información relevante y comunicar el estado hídrico de la planta de manera accionable.

En conclusión, los cinco objetivos específicos fueron alcanzados en su totalidad, demostrando

la viabilidad técnica y funcional del sistema de detección de estrés hídrico basado en termografía infrarroja y hardware de bajo costo.

### 5.2.2. Fortalezas y Limitaciones del Sistema

#### Fortalezas

- **Bajo Costo y Accesibilidad:** Uso de componentes open-source/asequibles (ESP32-S3, MLX90640, MEMS) democratiza el acceso a la termografía (Dong y cols., 2024; Sánchez-Sutil y Cano-Ortega, 2021).
- **Monitoreo Continuo y No Invasivo:** Seguimiento constante sin afectar la planta (Jones, 2004; García Tejero y cols., 2015).
- **Sistema Integral Validado:** Solución completa (hardware caracterizado + software + PoC) aumenta valor práctico (Acorsi y cols., 2020).
- **Sensibilidad Demostrada:** La PoC validó detección de cambios térmicos correlacionados con estrés hídrico (Pineda y cols., 2021).
- **Arquitectura Hardware Fiable:** La combinación ESP32-S3 + MLX90640 (nuevo) + BME280 fue validada cuidadosamente. (Giménez-Gallego y cols., 2021).

#### Limitaciones

- **Alcance Experimental (PoC):** Realizado con  $n = 1$  en microinvernadero. Impide validación estadística robusta y generalización a campo abierto (Battaglia y cols., 2021; Laveglia y cols., 2024).
- **Impacto del Desgaste:** Demostrado cuantitativamente para sensores de bajo costo, requiere calibración periódica o estrategias de corrección (Jiao y cols., 2022; Yun y cols., 2023).

- **Resolución del Sensor Térmico:**  $32 \times 24$  píxeles (MLX90640) limita análisis a mayor distancia o detalles finos (Melexis, 2021).
- **Caracterización metrológica incompleta:** No incluyó comparación directa contra equipo de referencia científico para exactitud absoluta; calibración térmica en rango acotado (Dong y cols., 2024; Acorsi y cols., 2020).
- **Dependencia de Conectividad:** Funcionalidad en tiempo real depende de Wi-Fi (mitigado con SD).
- **Durabilidad a Largo Plazo:** Experimento de 55 días insuficiente para evaluar estabilidad a largo plazo (Pineda y cols., 2021).

### **5.2.3. Impacto Potencial**

La implementación de este sistema caracterizado tiene el potencial de generar un impacto significativo en la agricultura, especialmente para pequeños y medianos productores de arándano:

- **Optimización del Riego y Uso del Agua:** Herramienta precisa y asequible para programar riego según necesidades reales, reduciendo consumo (García Tejero y cols., 2015; Balbontín y Reyes, 2023).
- **Sostenibilidad y Resiliencia:** Promover prácticas agrícolas sostenibles y adaptadas al cambio climático (Laveglia y cols., 2024).
- **Democratización Tecnológica:** Reducir brecha tecnológica, brindando alternativas accesibles de agricultura de precisión (Vargas Q. y Best S., 2021; Dong y cols., 2024).

### **5.3. Recomendaciones y Trabajo Futuro**

A partir de los resultados obtenidos y las limitaciones identificadas, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuro orientadas a fortalecer la precisión, autonomía y aplicabilidad del sistema:

- **Validación experimental ampliada:** Ejecutar estudios en campo abierto con diseños estadísticos robustos (réplicas y controles), que permitan evaluar la variabilidad térmica y fisiológica entre plantas y diferentes condiciones microclimáticas (Laveglia y cols., 2024).
- **Calibración comparativa y térmica:** Comparar las mediciones del sistema frente a equipos de referencia (cámaras termográficas científicas y bomba de presión de Scholander) para establecer la exactitud absoluta del CWSI y definir una línea base específica para el cultivo de arándano Biloxi en condiciones locales (Dong y cols., 2024; Quezada y cols., 2020; Katimbo y cols., 2022).
- **Segmentación automática del dosel:** Incorporar algoritmos de visión por computador que permitan distinguir de forma autónoma el dosel foliar del fondo (suelo, estructura o maceta), empleando cámaras visibles o térmicas duales. Esto mejoraría significativamente la precisión de la temperatura foliar promedio y, por ende, del cálculo del CWSI (Sharma y cols., 2024; Yun y cols., 2023).
- **Integración de estación meteorológica local:** Implementar una microestación meteorológica junto al sistema, para registrar parámetros como radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, permitiendo un análisis contextualizado del microclima y una interpretación más precisa del estrés hídrico.
- **Toma inteligente de mediciones:** Desarrollar un módulo de inteligencia artificial que determine de manera autónoma los momentos óptimos para realizar análisis o generar reportes,

considerando las condiciones recomendadas por la literatura (entre las 11:00 y 15:00 horas, bajo niveles adecuados de radiación y estabilidad ambiental). Dado que estas condiciones simultáneas se presentan con poca frecuencia, el sistema debería evaluar en tiempo real el nivel de *lux*, la temperatura ambiente y la humedad antes de iniciar una nueva medición.

- **Corrección y calibración en tiempo real:** Explorar el uso de modelos de aprendizaje automático embebidos en el microcontrolador para compensar la deriva térmica del sensor y mantener la precisión de las lecturas a lo largo del tiempo (Jiao y cols., 2022; Giménez-Gallego y cols., 2021).
- **Durabilidad y mantenimiento:** Realizar estudios prolongados de estabilidad y envejecimiento de los sensores en condiciones reales de campo, evaluando la necesidad de encapsulados protectores o rutinas de recalibración periódicas.

## 5.4. Conclusiones Finales

El presente trabajo logró cumplir con el objetivo general propuesto, desarrollando y validando un sistema funcional de bajo costo para la detección del estrés hídrico en plantas de arándano Biloxi mediante termografía infrarroja. El sistema combinó sensores térmicos y ambientales, un módulo de control basado en ESP32-S3 y un software de adquisición y análisis capaz de calcular indicadores térmicos como  $\Delta T$  y el índice CWSI.

Durante la etapa experimental, el prototipo fue inicialmente validado en una planta bajo condiciones controladas y posteriormente evaluado en un conjunto de seis plantas, con mediciones realizadas en paralelo sobre tres de ellas: una bien regada, una planta de control monitorizada y otra sometida a estrés hídrico por suspensión de riego. Esta configuración permitió observar diferencias térmicas coherentes entre los tratamientos, evidenciando la sensibilidad del sistema para reflejar

cambios fisiológicos asociados al déficit hídrico.

El proceso de caracterización del hardware confirmó la viabilidad técnica de la arquitectura seleccionada y permitió identificar los márgenes de error de los sensores térmicos y ambientales. Asimismo, se observó que el desgaste y la deriva térmica pueden afectar la estabilidad de las mediciones, resaltando la importancia de la calibración y el mantenimiento preventivo para aplicaciones prolongadas en campo.

El software desarrollado demostró capacidad para la captura continua de datos, el procesamiento del CWSI y la generación de reportes de estado hídrico. Si bien los resultados son prometedores, se reconoce que el sistema aún requiere validaciones más extensas en condiciones de campo y con un mayor número de réplicas para consolidar su precisión y aplicabilidad agronómica.

En conjunto, este proyecto constituye un avance inicial en la aplicación de herramientas de bajo costo y visión térmica para el monitoreo del estrés hídrico. Sin pretender ofrecer una solución definitiva, los resultados obtenidos aportan una base experimental y técnica sólida sobre la cual se pueden desarrollar versiones más completas, precisas y autónomas del sistema en trabajos futuros.

## Referencias

- Acorsi, M. G., Gimenez, L. M., y Martello, M. (2020). Assessing the performance of a low-cost thermal camera in proximal and aerial conditions. *Remote Sensing*, 12(21), 3591. doi: 10.3390/rs12213591
- Aimeth, B. A. (2018). *El cultivo del arándano (Vaccinium corymbosum) y su proyección en Colombia*. Repositorio - Universidad De Ciencias Aplicadas Y Ambientales UDCA. Descargado de <https://repository.udca.edu.co/entities/publication/261078c5-c821-4368-ba74-911def8169a8>
- Almutairi, K. F., Bryla, D. R., y Strik, B. C. (2021). Sensitivity of Northern Highbush Blueberry cultivars to soil water deficits during various stages of fruit development. *HortScience*, 56(2), 154–162. doi: 10.21273/HORTSCI15493-20
- Augusto, R. T. C., y Emerson, F. G. (2023). *Manejo técnico del arándano (Vaccinium corymbosum) con fines de exportación a mercados norteamericanos*. Repositorio Institucional Universidad de Cundinamarca. Descargado de <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/5010>
- Aux, J. H. E., Correa, H. L., y Girón, A. D. R. (2022). El ensayo no destructivo usando termografía infrarroja en el mundo y en América Latina: Una revisión. *Scientia Et Technica*, 27(1), 15–27. doi: 10.22517/23447214.24717
- Balbontín, C., y Reyes, M. (2023). *Uso de inductores hormonales para incrementar la tolerancia a sequía y calidad de frutos en arándano* (Inf. Téc.). Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Raihuén. Descargado de <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/247fc25b-b0d9-4290-b3d8-72672f064336/content> (Boletín INIA N° 484)
- Battaglia, D., Paolucci, E., y Ughetto, E. (2021). The role of Proof-of-Concept programs in

facilitating the commercialization of research-based inventions. *Research Policy*, 50(6), 104268. doi: 10.1016/j.respol.2021.104268

Blanco, M. F., Barreto, B. C., y Camargo, Y. (2023). *Boletín red de observatorios de boyacá: Caracterización de la producción agrícola del departamento de boyacá* (Inf. Téc.) Gobernación de Boyacá y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Descargado de [https://www.uptc.edu.co/sitio/export/sites/default/portal/sitios/universidad/vic\\_aca/facultades/fac\\_ecoadm/preg/admin\\_190\\_t/.content/docs/Boletin-Red-Observatorios-de-Boyaca.pdf](https://www.uptc.edu.co/sitio/export/sites/default/portal/sitios/universidad/vic_aca/facultades/fac_ecoadm/preg/admin_190_t/.content/docs/Boletin-Red-Observatorios-de-Boyaca.pdf)

Carolayn, M. Q., y Katherin, S. A. A. (2020). *Predicción del crecimiento del hongo Botrytis spp en fresa Fragaria ananassa por medio de termografía infrarroja* (Trabajo de Grado). Universidad de La Salle. (Handle: <https://hdl.handle.net/20.500.14625/33631>)

Cho, S. B., Soleh, H. M., Choi, J. W., Hwang, W.-H., Lee, H., Cho, Y.-S., . . . Kim, G. (2024). Recent methods for evaluating crop water stress using AI techniques: A review. *Sensors*, 24(19), 6313. doi: 10.3390/s24196313

Congreso de la República de Colombia. (2009). *Ley 1273 de 2009. Por medio de la cual se modifica el Código Penal, se crea un nuevo bien jurídico tutelado - denominado "de la protección de la información y de los datos" se preservan integralmente los sistemas que utilicen las tecnologías de la información y las comunicaciones, entre otras disposiciones.* Bogotá: Diario Oficial No. 47.223.

Congreso de la República de Colombia. (2012). *Ley estatutaria 1581 de 2012. Por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales.* Bogotá: Diario Oficial No. 48.587.

Consejo Superior de la Universidad de Cundinamarca. (2018). *Acuerdo No. 000004. Por medio del cual se adopta el Estatuto de Propiedad Intelectual de la Universidad de Cundinamarca.* Fusagasugá: Universidad de Cundinamarca.

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2025). *Microdatos de exportaciones 2024*. Descargado de <https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/472> ([Archivo de datos])
- Dong, Y., Sloan, G., y Chappuis, J. (2024). Open-source time-lapse thermal imaging camera for canopy temperature monitoring. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100430. doi: 10.1016/j.atech.2024.100430
- Erazo-Aux, J. H., Loaiza-Correa, H., y Restrepo-Girón, A. D. (2022). El ensayo no destructivo usando termografía infrarroja en el mundo y en américa latina: Una revisión. *Scientia et Technica*, 27(1), 15–26. doi: 10.22517/23447214.24717
- García Tejero, I. F., Perea Martos, A. J., Navarro Ramos, M. J., Hernández Cotán, A., y Durán Zuazo, V.-H. (2015). *La termografía de infrarrojos para la gestión de los recursos hídricos en la agricultura* (Inf. Téc.) SERVIFAPA - Plataforma de Asesoramiento y Transferencia del Conocimiento Agrario y Pesquero En Andalucía. Descargado de <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registro-servifapa/51277665-b330-405b-accc-5b87e3869c5f>
- Giménez-Gallego, J., González-Teruel, J. D., Soto-Valles, F., Jiménez-Buendía, M., Navarro-Hellín, H., y Torres-Sánchez, R. (2021). Intelligent thermal image-based sensor for affordable measurement of crop canopy temperature. *Computers and Electronics in Agriculture*, 188, 106319. doi: 10.1016/j.compag.2021.106319
- Hamui-Sutton, A. (2013). Un acercamiento a los métodos mixtos de investigación en educación médica. *Investigación en Educación Médica*, 2(8), 211–216.
- Hernanda, R. A. P., Lee, H., Cho, J. i., Kim, G., Cho, B.-K., y Kim, M. S. (2024). Current trends in the use of thermal imagery in assessing plant stresses: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 224, 109227. doi: 10.1016/j.compag.2024.109227
- Idso, S. B., Jackson, R. D., y Reginato, R. J. (1981). Remote sensing of crop yields. *Science*,

- 214(4516), 19–25. doi: 10.1126/science.7025257
- INIA. (2017). *Manual de manejo agronómico del arándano*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Descargado de <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/f5e8c8a0-8bc7-4759-891a-4115523d82a4/content> (Boletín INIA N° 371)
- Jiao, F., Wang, K., Shuang, F., Dong, D., y Jiao, L. (2022). A smartphone-based sensor with an uncooled infrared thermal camera for accurate temperature measurement of pig groups. *Frontiers in Physics*, 10, 893131. doi: 10.3389/fphy.2022.893131
- Jiménez, D., y Mayorga, Y. (2021). *Desarrollo de técnicas no invasivas ni destructivas para la detección de plagas o enfermedades en el Aguacate Hass a través del procesamiento de imágenes termográficas*. Repositorio Institucional UTP. ([Proyecto de grado, Universidad Tecnológica de Pereira]. Handle: <https://hdl.handle.net/11059/13904>)
- Jones, H. G. (2004). Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research*, 41, 107–163. doi: 10.1016/S0065-2296(04)41003-9
- Kappes, J. D., y Balbi, C. N. (2024). Uso de termografía en híbridos de maíz (*Zea Mays L.*) con deficiencia hídrica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinaria*, 8(2), 4361–4379. doi: 10.37811/cl\_rcm.v8i2.10840
- Karner, G. (1993). *Resource estimation for Objectory projects* (Tesis de Master no publicada). University of Linköping, Sweden. (Master's Thesis No. LiTH-IDA-Ex-9344, Department of Computer and Information Science)
- Katimbo, A., Rudnick, D. R., DeJonge, K. C., Lo, T. H., Qiao, X., Franz, T. E., . . . Duan, J. (2022). Crop water stress index computation approaches and their sensitivity to soil water dynamics. *Agricultural Water Management*, 266, 107575. doi: 10.1016/j.agwat.2022.107575
- Laveglia, S., Altieri, G., Genovese, F., Matera, A., y Di Renzo, G. C. (2024). Advances in sustainable crop management: Integrating precision agriculture and proximal sensing. *AgriEngineering*,

6(3), 3084–3120. doi: 10.3390/agriengineering6030177

Melexis. (2021). *MLX90640 datasheet: 32x24 IR array* (Inf. Téc.) Melexis. Descargado de <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/datasheet-mlx90640> (Revisión 12)

Morales, C. G. (Ed.). (2017). *Manual de manejo agronómico del arándano*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Descargado de <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6673> (Boletín INIA N° 371)

Pineda, M., Barón, M., y Pérez-Bueno, M. L. (2021). Thermal imaging for plant stress detection and phenotyping. *Remote Sensing*, 13(1), 68. doi: 10.3390/rs13010068

Poblete-Echeverría, C., Fuentes, S., Ortega-Farias, S., Gonzalez-Talice, J., y Yuri, J. A. (2023). Infrared thermal imaging for detecting water stress in blueberry plants. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 209(1), 56–70. doi: 10.1111/jac.12582

Pradawet, C., Khongdee, N., Pansak, W., Spreer, W., Hilger, T., y Cadisch, G. (2023). Thermal imaging for assessment of maize water stress and yield prediction under drought conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 209(1), 56–70. doi: 10.1111/jac.12582

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP). (s.f.). *Objetivos de desarrollo sostenible*. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>. (s. f. Recuperado el 18 de julio de 2025)

Quezada, C., Bastias, R., Quintana, R., Arancibia, R., y Solís, A. (2020). Validación del Índice de estrés hídrico de cultivo (CWSI) mediante termografía infrarroja y su incidencia en rendimiento y calidad en manzanas ‘Royal Gala’. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 36(3), 198–207. doi: 10.29393/CHJAAS36-18VICQ50018

Quintana Reina, A. (2020). *Manual técnico y administrativo para la implementación de un cultivo de arándano (Vaccinium corymbosum L.) en el altiplano cundiboyacense*. Repositorio Institucional UPTC. Descargado de <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/>

**8408** ([Trabajo de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia])

- Rinza, J., Ramírez, D. A., y Ninanya, J. (2021). *Guía de práctica de campo: Monitoreo de rasgos funcionales en los cultivos para la detección de estrés temprano: La conductancia estomática y termografía infrarroja como herramienta de medidas claves* (Inf. Téc.) Centro Internacional de la Papa. doi: 10.4160/9789290605676
- Rumbaugh, J., Jacobson, I., y Booch, G. (2007). *El lenguaje unificado de modelado: Manual de referencia* (2a ed.). Madrid: Pearson Addison Wesley.
- Salgado Vargas, C., Sánchez-García, P., Volke-Haller, V. H., y Colinas León, M. T. B. (2018). Respuesta agronómica de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) al estrés osmótico. *Agrociencia*, 52(2), 231–239. Descargado de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952018000200231](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000200231)
- SCRUMstudy™. (2022). *A guide to the scrum body of knowledge (SBOK® Guide)* (4th ed.).
- Sharma, G., Dwibedi, V., Seth, C. S., Singh, S., Ramamurthy, P. C., Bhadrecha, P., y Singh, J. (2024). Direct and indirect technical guide for the early detection and management of fungal plant diseases. *Current Research in Microbial Sciences*, 7, 100276. doi: 10.1016/j.crmicr.2024.100276
- Sánchez-Sutil, F., y Cano-Ortega, A. (2021). Smart control and energy efficiency in irrigation systems using LoRaWAN. *Sensors*, 21(21), 7041. doi: 10.3390/s21217041
- Vargas Q., P., y Best S., S. (Eds.). (2021). *Introducción a la agricultura de precisión 4.0 en huertos de arádanos*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Descargado de <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/8d7bd362-1679-4549-91eb-494d59ea390b>
- Vieira, G. H. S., y Ferrarezi, R. S. (2021). Use of thermal imaging to assess water status in citrus plants in greenhouses. *Horticulturae*, 7(8), 249. doi: 10.3390/horticulturae7080249
- Yu, D. J., Rho, H., Kim, S. J., y Lee, H. J. (2015). Photosynthetic characteristics of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* cv. Bluecrop) leaves in response to water stress and

subsequent re-irrigation. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 90(5), 550–556. doi: 10.1080/14620316.2015.11668713

Yun, H., Lo, S., Diepenbrock, C. H., Bailey, B. N., y Earles, J. M. (2023). *VisTA-SR: Improving the accuracy and resolution of low-cost thermal imaging cameras for agriculture.* doi: 10.48550/arXiv.2405.19413