



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Proyecto: LM-PI-UIIT-116-2020-R1

### **MEDICIÓN DE RESPUESTAS EN PAVIMENTOS INSTRUMENTADOS EN COSTA RICA**

Preparado por:

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte

San José, Costa Rica  
Agosto, 2020

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.



<b>Informe</b> LM-PI-UIIT-116-2020-R1		<b>Copia No.</b> 1
<b>Título y subtítulo:</b> MEDICIÓN DE RESPUESTAS EN PAVIMENTOS INSTRUMENTADOS EN COSTA RICA		<b>Fecha del Informe</b> Agosto, 2020
<b>Organización y dirección</b> <b>Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR)</b> Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Teléfono central: (506) 2511-2500 / Fax central: (506) 2511-4440		
<b>Resumen</b> <i>El presente informe resume los esfuerzos que ha realizado la Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte (UIIT) en el tema de instrumentación de pavimentos, el cual abarca mediciones con estaciones remotas y portátiles, tanto en rutas convencionales nacionales como algunos casos de estudio en pavimentos aeroportuarios.</i>  <i>Los equipos utilizados han permitido recolectar datos de temperatura, presión en capas intermedias y deformaciones unitarias a tensión en mezclas asfálticas, entre otras. El objetivo de estas mediciones ha sido validar respuestas obtenidas a través de procesos de modelación y recolectar datos que puedan compararse con valores obtenidos en el LanammeUCR mediante el simulador de vehículos pesados HVS.</i>  <i>Algunos de los resultados han permitido validar de forma preliminar resultados obtenidos en el LanammeUCR, respecto a valores iniciales de módulo resiliente en bases estabilizadas con cemento, medir las magnitudes de respuestas obtenidas en campo en rutas reales e incluso medir la magnitud de respuestas obtenidas en pavimentos masivos, como en el caso de pavimentos aeroportuarios.</i>  <i>Todo esto de la mano de esquemas de mediciones remotas (vía internet) y equipos de alto desempeño que permiten registrar valores con mucha precisión y de forma eficiente.</i>		
<b>Palabras clave:</b> Instrumentación, monitoreo, pavimentos, respuestas		<b>Nivel de seguridad:</b> Ninguno
<b>Preparado por:</b> <b>Ing. Eliécer Arias Barrantes.</b> Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte, PITRA		
<b>Fecha:</b> 04 / 08 / 20		
<b>Revisado por:</b> <b>Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.</b> Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte, PITRA		<b>Aprobado por:</b> <b>Ing. Ana Luisa Elizondo</b> Coordinadora Programa de Infraestructura del Transporte



## Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVO GENERAL .....	14
1.1.1	<i>Objetivos Específicos .....</i>	<i>14</i>
1.2	ANTECEDENTES.....	14
1.3	JUSTIFICACIÓN.....	17
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1	GENERALIDADES .....	18
2.2	EQUIPOS UTILIZADOS PARA CAPTURA DE RESPUESTAS.....	20
2.2.1	<i>Instalación de sensores .....</i>	<i>23</i>
2.2.2	<i>Equipo para monitoreo de respuestas en pavimentos.....</i>	<i>36</i>
2.2.3	<i>Equipo para el monitoreo remoto de variables climáticas .....</i>	<i>46</i>
2.3	COMUNICACIÓN CON LOS EQUIPOS .....	56
2.4	PROGRAMACIÓN DE LOS EQUIPOS (CRBASICEDITOR).....	56
<b>3</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>	<b>60</b>
3.1	PRUEBA DE CARGA .....	60
3.1.1	<i>Modelación de pavimentos.....</i>	<i>61</i>
3.1.2	<i>Medición de respuesta en campo .....</i>	<i>67</i>
3.2	MEDICIONES PERIÓDICAS SOBRE RUTAS NACIONALES .....	68
3.2.1	<i>Ruta Nacional N° 35, Abundancia -Florencia (Tramo DPLP-CR # 26) .....</i>	<i>68</i>
3.2.2	<i>Ruta Nacional N°1, Cañas-Liberia (Tramo DPLP-CR # 20).....</i>	<i>77</i>
3.3	PROYECTOS ESPECIALES .....	83
3.3.1	<i>Mediciones en puerta tres AIJS, pavimento rígido .....</i>	<i>84</i>
3.3.2	<i>Mediciones en el conector Bravo-Sur AIJS, pavimento flexible .....</i>	<i>95</i>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>100</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>104</b>



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

ANEXO A: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EQUIPOS UTILIZADOS ..... 104

ANEXO B.1: PROCEDIMIENTO DE CONFIGURACIÓN DE LA COMUNICACIÓN..... 117

*Red pública*..... 117

*Red privada (VPN)*..... 122

ANEXO B.2: PROGRAMA DATALOGGER CR6, PAVIMENTO FLEXIBLE ..... 131

ANEXO C: PESOS MÁXIMOS DE VEHÍCULOS DE CARGA ..... 140



## Índice de Figuras

<i>Figura 1.</i> Esquema sobre problemática general-solución en diseños .....	18
<i>Figura 2.</i> Capas de una estructura de pavimento .....	18
<i>Figura 3.</i> Celda de presión, modelo 3500-2 de 400kPa.....	21
<i>Figura 4.</i> Galga extensiométrica, cuarto de puente de 120Ω.....	21
<i>Figura 5.</i> Ejemplo termopar tipo K.....	22
<i>Figura 6.</i> Sensores ubicados en losa de concreto.....	24
<i>Figura 7.</i> Detalle termopar tipo K y galga extensiométrica.....	25
<i>Figura 8.</i> Protección de instrumentación con concreto (fresco) colocado de forma manual antes de la colada .....	26
<i>Figura 9.</i> Colado de la losa de concreto.....	26
<i>Figura 10.</i> Losa de concreto finalizada.....	27
<i>Figura 11.</i> Instalación de celdas de presión sobre “cama” de arena .....	28
<i>Figura 12.</i> Recubrimiento de celdas de presión con arena .....	29
<i>Figura 13.</i> Registro de etiquetas y códigos de los sensores .....	30
<i>Figura 14.</i> Ubicación preliminar de los sensores (huella de los vehículos, según planos constructivos) .....	31
<i>Figura 15.</i> Tamizaje de mezcla caliente, para protección de galgas extensiométricas en mezcla asfáltica .....	31
<i>Figura 16.</i> Protección de las galgas, con mezclas fina, tamizada en sitio .....	32
<i>Figura 17.</i> Protección de las galgas, con mezclas fina, tamizada en sitio previo a la colocación de la mezcla asfáltica .....	33
<i>Figura 18.</i> Identificación para seguimiento .....	34
<i>Figura 19.</i> Verificación de los datos e integridad de los sensores .....	35
<i>Figura 20.</i> Sistema de adquisición de datos remoto, ubicado en la puerta 3 del AIJS .....	37



*Figura 21.* Cámara para asociación de respuestas, ubicada hacia la puerta 3 del AIJS ..... 37

*Figura 22.* Sistema de adquisición de datos remoto, ubicado en el conector bravo del AIJS..... 38

*Figura 23.* Sistema de adquisición portátil ..... 39

*Figura 24.* Conector militar utilizado, para el equipo de la Figura 23 ..... 40

*Figura 25.* Estación meteorológica compacta para registro de humedad de suelos..... 41

*Figura 26.* Enlace celular industrial 4G LTE (RV50)..... 42

*Figura 27.* Cámara CCFC ..... 43

*Figura 28.* Módulos de medición analógica..... 44

*Figura 29.* Registrador de datos CR6..... 45

*Figura 30.* Estación climática compacta propiedad del LanammeUCR ..... 47

*Figura 31.* Registrador de datos compacto con ethernet (CR310)..... 48

*Figura 32.* ClimaVUE 50..... 49

*Figura 33.* Sensor ultravioleta SU-100-SS..... 53

*Figura 34.* Respuesta espectral del sensor ..... 53

*Figura 35.* Reflectómetro de contenido de agua en el suelo ..... 55

*Figura 36.* Ingreso al CRBasic Editor..... 57

*Figura 37.* Ventana principal del CRBasic Editor ..... 58

*Figura 38.* Espesores de la estructura analizada ..... 61

*Figura 39.* Imagen térmica pavimento analizado..... 62

*Figura 40.* Pesaje y verificación de carga en el vehículo C2 ..... 63

*Figura 41.* Paso de vehículo con carga patrón en zona instrumentada ..... 63

*Figura 42.* Salida software ImoDin-PITRA para mezcla analizada..... 64

*Figura 43.* Interfaz de usuario software PITRA-Pave, módulo estructura..... 65

*Figura 44.* Modelación de un simple, en software de multicapa elástica ..... 66



*Figura 45.* Salida del software PITRA-Pave..... 66

*Figura 46.* Captura de datos vehículo C3..... 67

*Figura 47.* Estructura de pavimento del tramo Abundancia – Florencia ..... 68

*Figura 48.* Vehículo de carga liviana en el tramo Abundancia – Florencia..... 69

*Figura 49.* Presión en la subrasante con vehículo de carga liviana tramo Abundancia – Florencia. 70

*Figura 50.* Presión en la subbase con vehículo de carga liviana tramo Abundancia – Florencia ..... 70

*Figura 51.* Camión tipo C2 en la ruta Abundancia – Florencia ..... 71

*Figura 52.* Presión en la subrasante con camión C2 tramo Abundancia – Florencia..... 72

*Figura 53.* Presión en la subbase camión C2 tramo Abundancia – Florencia ..... 72

*Figura 54.* Camión tipo C2 en el tramo Abundancia – Florencia..... 73

*Figura 55.* Presión en la subrasante camión C2 tramo Abundancia – Florencia ..... 74

*Figura 56.* Presión en la subbase camión C2 tramo Abundancia – Florencia ..... 74

*Figura 57.* Vehículo T3-S2 en la ruta Abundancia – Florencia ..... 75

*Figura 58.* Presión en la subrasante vehículo T3-S2 tramo Abundancia – Florencia..... 76

*Figura 59.* Presión en la subbase vehículo T3-S2 tramo Abundancia – Florencia ..... 76

*Figura 60.* Estructura de pavimento de la ruta Cañas Liberia..... 77

*Figura 61.* Autobús en el tramo Cañas – Liberia ..... 78

*Figura 62.* Tiempo vs. Presión para un autobús tramo Cañas – Liberia ..... 78

*Figura 63.* Vehículo C3 en la ruta Cañas – Liberia ..... 79

*Figura 64.* Tiempo vs. Presión vehículo C3 tramo Cañas – Liberia..... 79

*Figura 65.* Vehículo T3-S2 en el tramo Cañas – Liberia (a)..... 80

*Figura 66.* Vehículo T3-S2 en el tramo Cañas – Liberia (b) ..... 80

*Figura 67.* Tiempo vs. Presión vehículo T3-S2 tramo Cañas – Liberia..... 81

*Figura 68.* Vehículo T3-S2 (a) tramo Cañas – Liberia ..... 81



*Figura 69.* Vehículo T3-S2 (b) tramo Cañas – Liberia..... 82

*Figura 70.* Tiempo vs. Presión en vehículo T3-S2 tramo Cañas – Liberia..... 82

*Figura 71.* Ubicación de la losa instrumentada, puerta 3 AIJS..... 83

*Figura 72.* Ubicación de instrumentación en el conector Bravo Sur AIJS ..... 84

*Figura 73.* Estructura de pavimento en la puerta tres, AIJS ..... 85

*Figura 74.* Ubicación de instrumentación instalada en la puerta tres, AIJS ..... 85

*Figura 75.* Paso eje trasero Aeronave Airbus A340-600 (a)..... 86

*Figura 76.* Aeronave Airbus A340-600 (b)..... 87

*Figura 77.* Tiempo vs. Presión vertical en el borde de la losa ..... 88

*Figura 78.* Tiempo vs. Presión vertical en el centro de la losa ..... 88

*Figura 79.* Tiempo vs. Presión vertical en la esquina de la losa ..... 89

*Figura 80.* Deformación unitaria fibra superior de la losa..... 89

*Figura 81.* Deformación unitaria en la fibra inferior de la losa ..... 90

*Figura 82.* Vehículo Airbus A340-600..... 91

*Figura 83.* Tiempo vs. Presión en el borde 02/10/2019 ..... 92

*Figura 84.* Tiempo vs. Presión en el centro 02/10/2019 ..... 92

*Figura 85.* Tiempo vs. Presión en la esquina 02/10/2019..... 93

*Figura 86.* Deformación en la galga superior 02/10/2019 ..... 93

*Figura 87.* Deformación en la galga inferior 02/10/2019 ..... 94

*Figura 88.* Ejemplo carga completa sobre el borde ..... 94

*Figura 89.* Resumen de registros para el sensor presión de la esquina de la losa, resumen de datos del 2018-2019 ..... 95

*Figura 90.* Estructura de pavimento conector Bravo Sur, AIJS..... 96

*Figura 91.* Ejemplo de aeronave Boeing 777..... 96



*Figura 92.* Presión en la subrasante 20/02/2020 (noche)..... 97

*Figura 93.* Presión en la subbase 20/02/2020 (noche) ..... 97

*Figura 94.* Deformación unitaria sensor H1, 20/02/2020 (noche) ..... 98

*Figura B1.1.* Icono de software LoggerNet versión 4. 5. 0. 1..... 117

*Figura B1.2.* Menú principal de software LoggerNet (configuración) ..... 117

*Figura B1.3.* Icono de activación del menú avanzado ..... 118

*Figura B1.4.* Ventana de configuración avanzada ..... 118

*Figura B1.5.* Serie de pestañas a seleccionar para añadir el sensor ..... 119

*Figura B1.6.* Ventana, “Add”, correctamente configurada..... 119

*Figura B1.7.* Resultado gráfico de añadir el sensor correctamente..... 120

*Figura B1.8.* Ventana de configuración para el “IPPort”..... 120

*Figura B1.9.* Ventana de configuración para el “CR300Series” ..... 121

*Figura B1.10.* Menú principal de software LoggerNet (conexión)..... 121

*Figura B1.11.* Conexión con sensores desactivada..... 122

*Figura B1.12.* Conexión con sensores activada ..... 122

*Figura B1.13.* OpenVPN GUI activado – desconectado..... 123

*Figura B1.14.* OpenVPN GUI activado – conectado ..... 123

*Figura B1.15.* Icono de software LoggerNet versión 4. 5. 0. 1..... 123

*Figura B1.16.* Menú principal de software LoggerNet (configuración) ..... 124

*Figura B1.17.* Ventana de configuración simplificada ..... 124

*Figura B1.18.* Ventana de introducción para añadir sensor ..... 125

*Figura B1.19.* Selección de sensor a añadir ..... 125

*Figura B1.20.* Tipo de conexión del sensor a añadir..... 126

*Figura B1.21.* Dirección IP del sensor a añadir ..... 126



*Figura B1.22.* Dirección de PackBus del sensor a añadir ..... 127

*Figura B1.23.* Código de seguridad del sensor a añadir ..... 127

*Figura B1.24.* Resumen de la configuración del sensor a añadir ..... 128

*Figura B1.25.* Ejemplos de la configuración de sensores de interés ..... 128

*Figura B1.26.* Menú principal de software LoggerNet (conexión) ..... 129

*Figura B1.27.* Conexión con sensores desactivada ..... 129

*Figura B1.28.* Conexión con sensores activada ..... 130



### Índice de Tablas

Tabla 1. *Instrumentos de medición* ..... 20

Tabla 2. *Ventajas y retos del equipo utilizado en el LanammeUCR*..... 22

Tabla 3. *Sensores incorporados en el Clima VUE50*..... 50

Tabla 4. *Porcentajes de error del equipo*..... 54

Tabla 5. *Muestra de datos Bravo-Sur AIJS, pavimento flexible* ..... 98

Tabla 6. *Resumen de datos de la muestra del conector Bravo-Sur AIJS, pavimento flexible*..... 100

Tabla A 1. *Especificaciones del Enlace celular industrial 4G LTE (RV50)* ..... 104

Tabla A 2. *Especificaciones de la cámara CCFC*..... 105

Tabla A 3. *Especificaciones de los módulos de medición analógica*..... 106

Tabla A 4. *Especificaciones del CR6* ..... 107

Tabla A 5. *Especificaciones del CR310* ..... 109

Tabla A 6. *Especificaciones del recinto Enc8/10*..... 110

Tabla A 7. *Especificaciones batería (BP7)* ..... 110

Tabla A 8. *Especificaciones del ClimaVUE 50*..... 111

Tabla A 9. *Especificaciones de los sensores del ClimaVUE 50* ..... 112

Tabla A 10. *Especificaciones del SU-100-SS*..... 113

Tabla A 11. *Especificaciones del reflectómetro*..... 114

Tabla A 12. *Variables determinadas con el reflectómetro* ..... 115



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Página en Blanco

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 12 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr  
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.  
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



## 1 INTRODUCCIÓN

Los programas de Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo (LTPP, por sus siglas en inglés), desarrollados principalmente en Estados Unidos y Canadá, han estudiado el comportamiento de diferentes secciones de pavimento en el tiempo. Lo anterior, lo han logrado abarcando más de 2500 secciones de prueba en pavimentos (flexibles y rígidos) distribuidos por toda Norte América (FHWA, 2017).

El programa de Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo de Costa Rica (DPLP-CR) busca desarrollar un modelo similar al desarrollado exitosamente en los Estados Unidos y Canadá. El proyecto pretende profundizar en el análisis y conocimiento del comportamiento de los pavimentos construidos en Costa Rica, al darles un seguimiento a lo largo de los años. Para esto se busca abarcar la mayor cantidad de secciones de carretera y parámetros posibles y realizar un análisis con un alto nivel de detalle de los tramos seleccionados.

Dentro de los parámetros a analizar se incluyen: auscultación visual, tráfico vehicular de la zona, clima, espesores de las capas que componen la estructura de pavimento y la caracterización de sus materiales, así como ensayos de desempeño como: deflectometría de impacto (FWD), índice de regularidad (IRI), fricción por medio del *GRIP Number*.

Sin embargo, para el caso de pavimentos nuevos que a futuro puedan ser incorporados al proyecto, y dado que es a largo plazo y que a la vez es de gran interés conocer los cambios en los pavimentos, también se plantea la posibilidad de instalar instrumentación para el monitoreo de respuestas in situ (temperatura del pavimento, deformaciones unitarias, presión estática).

Este informe presenta los esfuerzos realizados para obtener respuestas en pavimento flexibles, semirrígidos y rígidos, utilizando instrumentación embebida en la estructura de los pavimentos. Se muestran algunos equipos utilizados, configuraciones empleadas y resultados obtenidos en algunos proyectos, los cuales son almacenados con el propósito de crear una base de datos de respuestas de pavimentos. Lo anterior con la finalidad de que en un futuro permitan calibrar modelos de daño o validar resultados obtenidos en laboratorio respecto propiedades mecánicas de los materiales utilizados en proyectos de carretera.

Finalmente, se agradece de forma especial a los estudiantes Isaac Montoya Pereira y a Jordy Borbón Angulo en su calidad de asistentes, por su valiosa Participación en el desarrollo de este informe.

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 13 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



## 1.1 *Objetivo General*

Mostrar los procedimientos y resultados obtenidos en la medición de respuestas en estructuras de pavimentos de Costa Rica.

### 1.1.1 *Objetivos Específicos*

- Presentar los equipos utilizados por parte del LanammeUCR para medir respuestas en los pavimentos de forma autónoma.
- Mostrar el procedimiento de captura de señales eléctricas y su relación con la respuesta estructural en un pavimento.
- Mostrar el proceso de análisis y postproceso de la información capturada por los equipos.
- Exponer los resultados obtenidos en diferentes pavimentos monitoreados por el LanammeUCR.

## 1.2 *Antecedentes*

En la década de 1980, varias instituciones estadounidenses como Federal Highway Administration (FHWA) y *American Association of State Highway Transportation Official*, (AASHTO) iniciaron un estudio estratégico relacionado con evaluación del deterioro de la infraestructura del transporte. Una de las áreas de este estudio es el Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo (LTTP). Entre la información que han recolectado destaca el sistema de gerencia de información (IMS por sus siglas en inglés), el cual incluye la base de datos de desempeño de pavimentos (PPDB por sus siglas en inglés), base de datos del software de análisis de tráfico (LTAS por sus siglas en inglés) y el sistema de gerencia de información auxiliar (AIMS por sus siglas en inglés). Se han evaluado métodos de diseño, propuesto metodologías para rehabilitación, se ha determinado el efecto de distintas variables como el tráfico y el ambiente (FHWA, 2017).

Entre las investigaciones que se llevan a cabo en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), se encuentra el desarrollo de propuestas de la una Guía de Diseño Estructural Mecánica-Empírica de Pavimentos. aplicable nuestro país (Arias, 2020). Esto con el objetivo de resolver los problemas que generan las guías disponibles actualmente, ya que fueron calibradas para condiciones de tráfico y clima distintas a las propias de Costa Rica. Para lograr esto, se necesita calibrar ecuaciones y modelos que se adapten mejor. Sin embargo, previamente, se requiere monitorear el desempeño de estructuras de pavimento mediante instrumentación y sensores

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 14 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



de estructuras de pavimentos reales, con el objetivo de probar y validar resultados. Actualmente, se han logrado monitorear tramos en Costa Rica, en de la Ruta Nacional N° 1 sección Cañas – Liberia; Ruta 35, Florencia – La Abundancia y en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, AIJS, (Arias & Wang, 2019).

En Costa Rica, el LanammeUCR han realizado ensayos acelerados a escala natural para medir la respuesta de pavimentos ante cargas reales y cuantificar su deterioro. A partir de las mediciones obtenidas, es posible calibrar modelos de deformación plástica o agrietamientos por fatiga. Para el monitoreo de estas respuestas, se instrumentaron diferentes secciones de pavimento, se colocaron distintos sensores y se utilizó un HVS (*Heavy Vehicle Simulator*) para aplicar las cargas reales (Camacho & Arias, 2018).

Wang (2018) desarrolló Metodologías de Adquisición y Procesamiento de Datos, como parte de su trabajo de graduación en conjunto con el LanammeUCR. Estas metodologías están relacionadas a la respuesta adquirida en los tramos de pavimentos instrumentados en condiciones de campo. Además, realizaron verificaciones de la instrumentación en campo y se completaron adquisiciones de datos en el pavimento instrumentado del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, AIJS, con el fin de comprobar el uso de las herramientas. A partir de la información obtenida por Wang (2018), se permite la comparación entre respuestas teóricas y experimentales en pavimentos rígidos aeroportuarios.

Para diseñar pavimentos de buen desempeño, se debe tomar en consideración parámetros como el tráfico y el clima, ya que son los dos factores que mayor daño pueden causar en la estructura. La red vial de Costa Rica se extiende por todo el territorio nacional, con condiciones climáticas muy distintas, que van desde temperaturas altas en las zonas costeras, hasta temperatura muy bajas en regiones como el Cerro de la Muerte. También, se debe considerar que el territorio nacional se somete a precipitaciones anuales menores de 2000 mm en algunas zonas de Guanacaste y mayores de 5000 mm en regiones como el Zurquí.

El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) es una institución científica adscrita al Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), que tiene a cargo la coordinación de todas las actividades meteorológicas y climatológicas del país. Esta institución, posee una amplia red de estaciones meteorológicas, de las cuales 141 son automáticas y están distribuidas a lo largo del territorio nacional. Con estas estaciones se obtienen variables como la precipitación, humedad relativa, temperatura, velocidad y dirección del viento, radiación y presión atmosférica (IMN, 2020). Por otra parte, existen otras instituciones que

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 15 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



participan de igual forma en esas actividades, tales como la Universidad de Costa Rica con 9 estaciones en distintos puntos, el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) con una estación ubicada en su campus de Turrialba, y el Instituto Costarricense de Electricidad con 240 estaciones y 5 sensores de descargas atmosféricas (sin embargo, la información que recopila no es de uso gratuito y abierta), han sido parte de la ejecución de estudios climatológicos en el país.

Para realizar el diseño de un pavimento es necesario conocer los valores de las variables climatológicas del sitio donde se construirá, ya que las propiedades mecánicas de las distintas capas dependen de estos parámetros y varían estacionalmente como lo hacen las variables climatológicas. Por lo que, en el LanammeUCR, se investiga sobre la variación estacional del módulo de cada capa de pavimento en las distintas regiones climáticas del país (Gutiérrez & Arce, 2005).

En el LanammeUCR, se implementó una cámara ambientadora que simula condiciones climáticas de campo (precipitación, temperatura, radiación) para realizar ensayos a escala natural con ayuda de ensayos acelerados (HVS). Con este ensayo se encontraron problemas causados por el clima en el pavimento, tales como el ascenso de material fino a la superficie debido a la presencia de humedad y el aumento de la deformación que esto causa (Leiva, Aguiar & Camacho, 2016).

La Administración Federal de Autopistas de los Estados Unidos realizó una evaluación de los datos de desempeño de pavimentos a largo plazo (LTPP) para ser usados en la calibración de la Guía de Diseño de Pavimentos Mecánica-Empírica (MEPDG), mediante el uso de datos de Análisis de retrospectiva de la era moderna para investigaciones y aplicaciones (MERRA). El objetivo fue examinar las necesidades de las bases de datos climáticas, aplicar calibraciones a la MEPDG, elaborar una metodología para caracterizar índices climáticos en un lugar específico, dar recomendaciones para actualizar las bases de datos (LTPP) y examinar la necesidad de realizar mediciones de radiación continuas (FHWA, 2015).

La herramienta climática LTPP de la FHWA provee acceso a los datos climáticos MERRA de la NASA. Esta base de datos almacena información desde el año 1979 a una resolución de una hora para todos los países. Además, se pueden obtener datos tanto para un país en general, como para una ubicación específica y pone a disposición lecturas de temperatura, precipitación, humedad, viento y brillo solar (FHWA, 2017).

Perera (2015) realizó una investigación para determinar los factores climáticos necesarios para el diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica. Además, analiza la climatología de Costa Rica e índices utilizados

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 16 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



internacionalmente. Por otra parte, realizó una zonificación del índice de humedad de Thornthwaite (por sus siglas en inglés) y un análisis de sensibilidad del deterioro a los factores climáticos. A partir de la información recopilada, Perera (2015) obtuvo que los factores a considerar son la precipitación y la temperatura, y en segundo orden, el nivel freático y la radiación. Además, calibró las ecuaciones de Bells y Taiwan para predecir la temperatura del pavimento.

### 1.3 Justificación

Como otras obras civiles, los pavimentos tienen un periodo de diseño y de vida útil determinado, donde condiciones climáticas como humedad, temperatura y precipitación, sumadas al desgaste que provoca el constante proceso de carga y descarga originado por el flujo vehicular, da como resultado una falla asegurada en las estructuras de pavimento. Sin embargo, se espera que el proceso de falla sea lento y controlado cuando se siguen los procesos de diseño adecuados (ver Figura 1)

Establecer procesos de diseño adecuados, determina la confiabilidad de las predicciones realizadas en el diseño y para esto es requerido conocer cómo afectan las cargas y el clima a los pavimentos de Costa Rica, además se debe comprender de forma precisa cómo afectan los regímenes de humedad y temperatura a la estructura del pavimento, en sus diferentes capas.

El registro de respuestas reales de los pavimentos permite mejorar los procesos y protocolos de ensayos de laboratorio, canalizar de una mejor manera las estructuras por ensayar de forma acelerada con el simulador de vehículos pesados (HVS) y validar resultados obtenidos en el laboratorio. Además, permite mejorar los procesos de modelación y el de registro de variables climáticas permitirá validez de una mejor forma como se comportan los suelos ante los cambios de humedad externa.

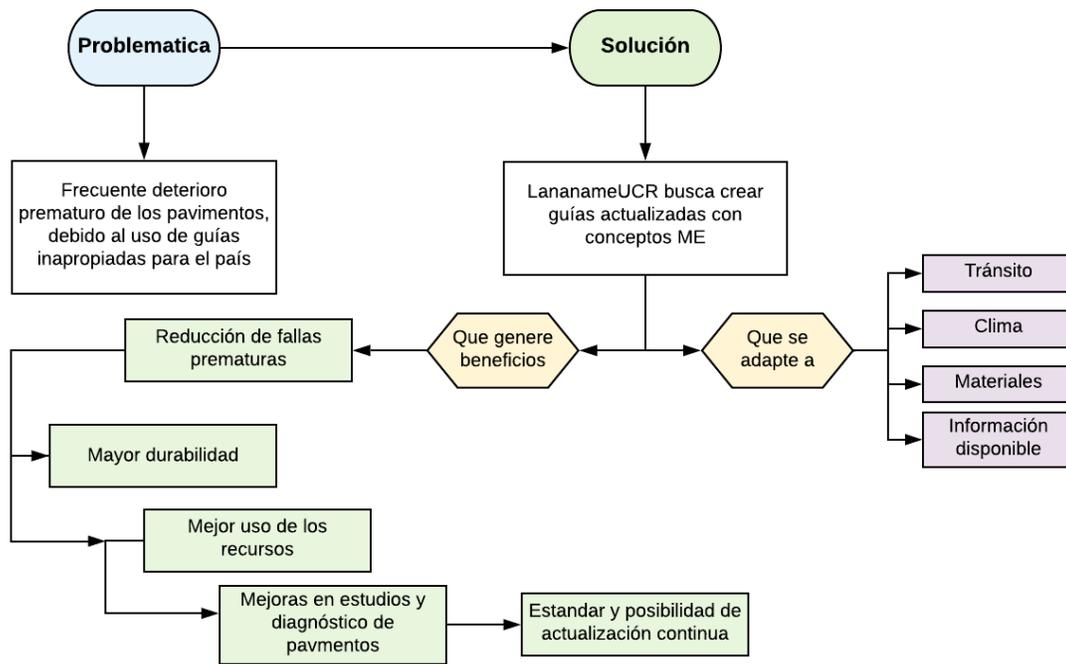


Figura 1. Esquema sobre problemática general-solución en diseños

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Generalidades

El pavimento es una estructura integral compuesto de diferentes capas, compuestas de diferentes materiales, dispuestas unas sobre otras, como las mostradas en la Figura 2, permitiendo el tránsito de vehículos de forma confortable, eficiente y segura. Algunas de las principales características de las estructuras de pavimento se detallan a continuación.

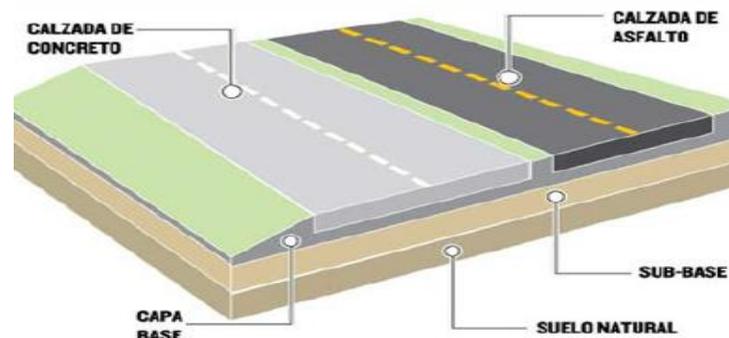


Figura 2. Capas de una estructura de pavimento

Fuente: (Carcialprocer, 2015)



- La calzada o superficie de rodamiento, puede clasificarse como:
  - Pavimento flexible (mezcla asfáltica)
  - Pavimento semirrígido (mezcla asfáltica y base estabilizada con cemento)
  - Pavimento rígido (losas de concreto hidráulico)
- Las capas son de espesor y material distinto.
- La distribución por capas que se realiza en las estructuras de pavimento busca que la capa superior disipe la magnitud de carga aplicada en ella hasta un valor que soporte la base y así sucesivamente hasta llegar al estrato más débil.

Los materiales que componen estas estructuras poseen un comportamiento distinto y por este motivo cada uno de ellos posee diferentes aplicaciones donde pueden ser más adecuados. La mezcla asfáltica componente principal de los pavimentos flexibles posee un comportamiento viscoelástico para las temperaturas de trabajo en Costa Rica. Esto quiere decir que el material posee un comportamiento que varía en función de ciertas condiciones, para las mezclas asfálticas las principales variables que condicionan su comportamiento mecánico son, la temperatura del material y la velocidad de carga.

Por este motivo es de suma importancia conocer la temperatura y la velocidad de operación de la ruta, ya que esto condiciona cómo se comportará en campo la mayoría del tiempo. El cómo se estimen estas variables durante la etapa de diseño, es de vital importancia, ya que el comportamiento de la estructura depende directamente de estas variables y este es uno de los motivos del porqué, un mismo material se comporta diferente en lugares distintos.

Sin embargo, los métodos de estimación de respuestas no son perfectos y deben validarse. Lo ideal es que se validen con resultados de campo, por ejemplo: registros de temperatura en pavimentos, presión en capas internas, deformaciones unitarias, humedad en capas granulares y suelos, esfuerzos de labeo en losas de concreto, entre otros.

Con esto se pretende medir valores en el campo (carreteras) para comparar con valores modelados, validar procesos de diseño e incluso determinar respuestas comunes para diferentes tipos de vehículos y ejes de carga. Para este propósito se utilizan dispositivos electrónicos que permiten transformar respuestas eléctricas como cambios en voltaje o resistencia, en variables ingenieriles como esfuerzos, deformaciones y deflexiones.

A partir de esto se pueden generar esquemas de medición, acordes al tipo de estructura a medir. A continuación, se describen los equipos que se han utilizado en el LanammeUCR, para capturar respuestas en pavimento flexibles y rígidos.

## 2.2 Equipos utilizados para captura de respuestas

Para poder analizar las deformaciones, deflexiones y esfuerzos provocados por la exposición del pavimento ante cargas externas y cambios climáticos se utilizan diferentes dispositivos de medición electrónicos (sensores), tales como:

**Tabla 1. Instrumentos de medición**

Celdas de presión (ver Figura 3)	Galgas Extensiométricas (ver Figura 4)	Termocuplas (ver Figura 5)
Medición de esfuerzos verticales.	Medición de deformaciones unitarias horizontalmente por cargas externas en pavimentos flexibles y alabeo por temperatura en pavimentos rígidos.	Sensores que se encargan de medir la temperatura.
Se utiliza para análisis la transmisión de cargas desde la capa superior hacia las capas internas.	Poseen forma de H y son colocados longitudinal y transversalmente. Además, según los datos que se deben obtener, pueden ser conectadas entre sí. El tipo de conexión utilizada es el cuarto de puente (solo una galga en el circuito) o puente completo (4 galgas)	Son utilizados en la parte superior e inferior de la losa para poder identificar los cambios de temperatura entre su superficie y el interior de esta. También se utilizan para medir la temperatura interna en capas de mezcla asfáltica
¿Cómo funcionan?		
Celdas de presión (ver Figura 3)	Galgas Extensiométricas (ver Figura 4)	Termocuplas (ver Figura 5)
Se tiene un aceite hidráulico en medio de las placas, conectado a un transductor de presión. Según sea activado, genera mediciones de voltaje, que son interpretados en esfuerzos verticales.	Las galgas extensiométricas funcionan como un circuito eléctrico. Dependiendo de su compresión o expansión, producto de las fuerzas a las que está sometido el elemento, se generan cambios en la resistencia del circuito. Esta modificación de la resistencia es relacionada con un cambio de voltaje, el cual se interpretado, matemáticamente, como una deformación unitaria.	Compuestas de Nickel - Cromo y Nickel - Aluminio que se encargan de medir la temperatura, mediante cambios de voltaje.

Fuente: (Wang, 2018). modificado Arias, 2020



**Figura 3.** Celda de presión, modelo 3500-2 de 400kPa



**Figura 4.** Galga extensiométrica, cuarto de puente de 120Ω



Figura 5. Ejemplo termopar tipo K

Definido los sensores por utilizar y su configuración dentro del pavimento, se debe considerar el equipo adecuado para la captura, almacenamiento e interpretación de señales. Los equipos utilizados en el LanammeUCR son modulares y sus componentes son de la casa matriz Campbell Scientific. Este equipo se adapta en función de las necesidades de instrumentación de cada sitio, en la Tabla 2 se muestran algunas características.

Tabla 2. Ventajas y retos del equipo utilizado en el LanammeUCR

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite la recolección de datos y configuración del equipo de forma remota.</li> <li>• Presenta mayor portabilidad.</li> <li>• Permite configurar el equipo de forma personalizada, debido al uso de un lenguaje de programación versátil.</li> <li>• Posea una adecuada resolución para proyectos con pavimentos rígidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere de conocimientos en programación y del lenguaje de utiliza el programa de control del equipo.</li> <li>• El aprendizaje para el uso del equipo requiere de la capacitación adecuada.</li> <li>• Amplias capacidades de conexión.</li> </ul>
---	--

No obstante, los desafíos del equipo se han superado por medio de la capacitación recibida en programación y lenguaje para el control y uso del equipo.



A continuación, se presentan características sobre la forma de funcionamiento de estos equipos.

- Es colocado y configurado para permitir la adquisición de datos de forma remota (vía internet) para las estaciones fijas y también se complementa con equipo móvil para mediciones programadas en sitio.
- Se realizan lecturas de esfuerzo verticales en todos los sensores, deformación de las galgas y mediciones de temperatura cada 5 minutos, para analizar el efecto de temperatura en el material, adicionalmente, se captura por eventos (carga externa) a la frecuencia configurada.
- La frecuencia utilizada, para la recolección de datos es de 20 Hz en zona de tráfico lento (<10 km/h) y 100 Hz en carreteras a flujo libre (>60km/h).
- Con el fin de asegurar que los datos recolectados sean relevantes para la investigación, se filtran por rangos de horas o magnitudes. Además, las mediciones justo antes y justo después de los eventos considerados como relevantes, también son almacenados.

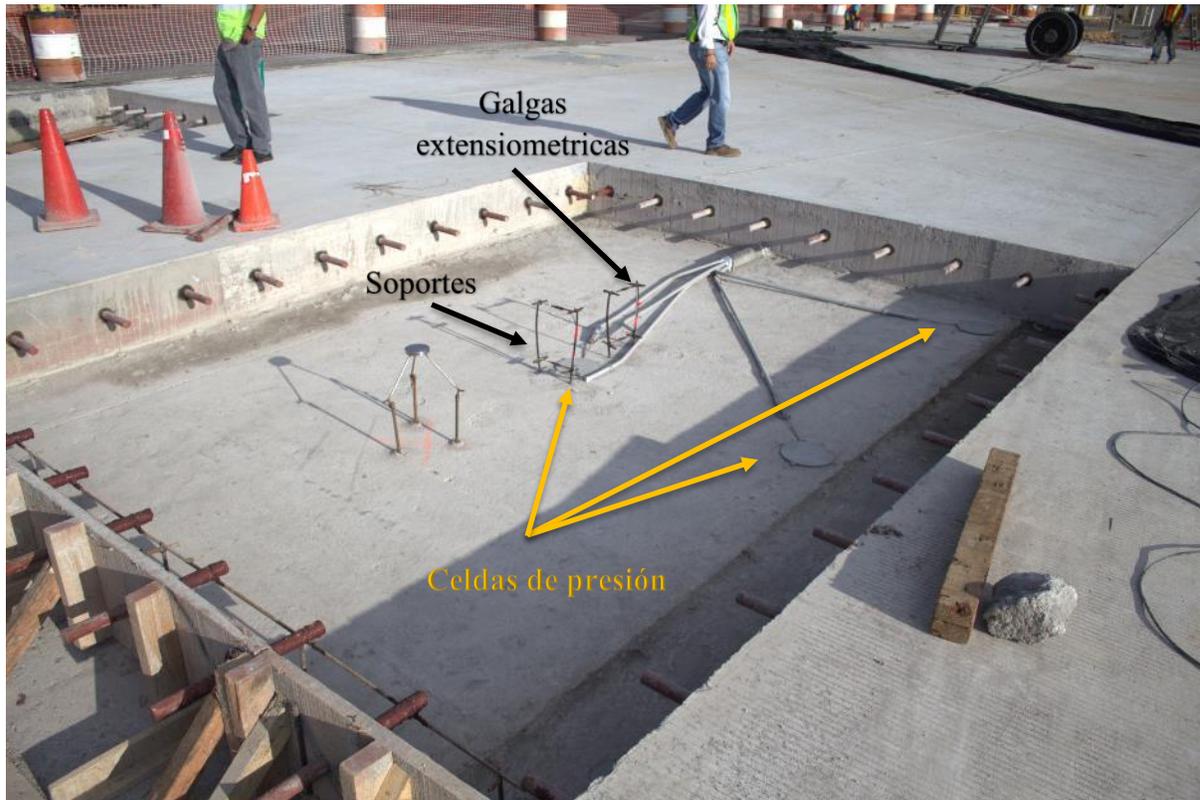
### 2.2.1 Instalación de sensores

El proceso de instalación de los sensores dentro de la estructura de pavimento es una de las etapas más críticas para garantizar la integridad de estos y la calidad de las mediciones durante la operación. Es importante conocer que el proceso es diferente para pavimento rígido y flexible.

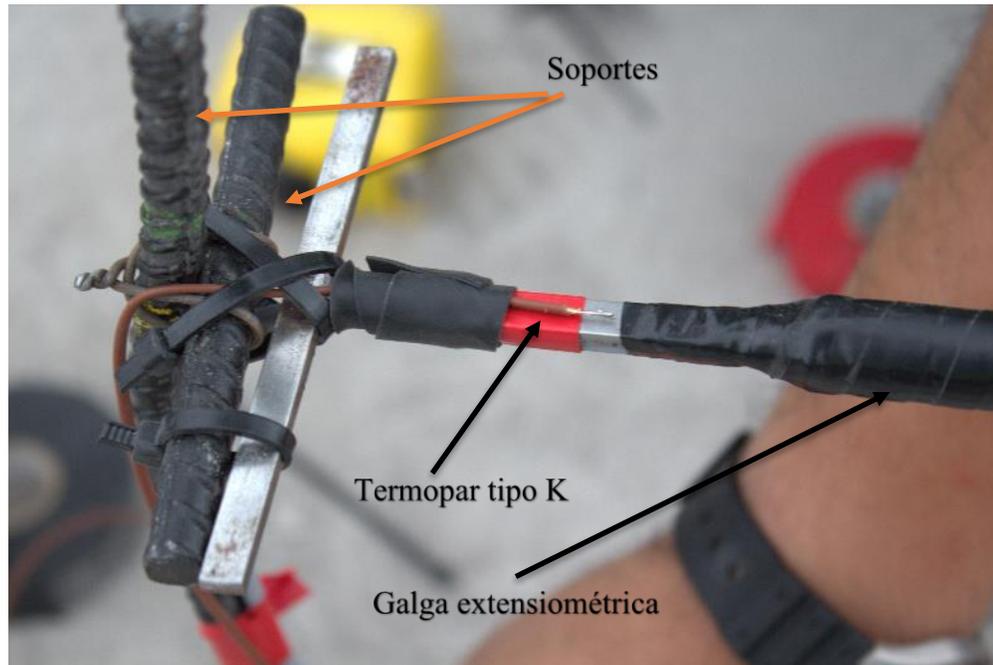
En el pavimento rígido, después de haber seleccionado los puntos con base al alcance del proyecto, se debe trabajar más durante la etapa previa a la construcción, ya que se deben construir elementos de soporte para poder ubicar los sensores a las profundidades deseadas, sin que estos restrinjan el movimiento del sensor.

En la *Figura 6* se muestra una de las configuraciones utilizadas en una losa de concreto hidráulico, ubicada en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, en esta se pueden observar los soportes donde están instaladas las galgas extensiométricas y las ubicaciones de las celdas de presión. En la *Figura 7*, se observa con mayor detalle el soporte lateral utilizado, junto a la ubicación de uno de los termopares.

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 23 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



**Figura 6.** Sensores ubicados en losa de concreto



**Figura 7.** Detalle termopar tipo K y galga extensiométrica

Es importante dar protección y cuidar los sensores durante la etapa constructiva, esto para garantizar que los cables no sufran daños y que los sensores no se desplacen, por este motivo se debe colocar material (concreto fresco) sobre ellos con cuidado. En la *Figura 8*, se muestra la etapa de colado de la losa, donde se ha colocado concreto fresco sobre la instrumentación de forma manual, para evitar que durante el vertido del concreto la instrumentación se sacuda. Estos cuidados deben seguir durante toda la etapa de colado.

En la *Figura 9* y *Figura 10*, puede observarse el proceso de colado y su finalización, etapas que deben realizarse con cuidado, garantizando la buena colocación del concreto y minimizando la afectación de los equipos durante la construcción.



**Figura 8.** Protección de instrumentación con concreto (fresco) colocado de forma manual antes de la colada



**Figura 9.** Colado de la losa de concreto



**Figura 10.** Losa de concreto finalizada

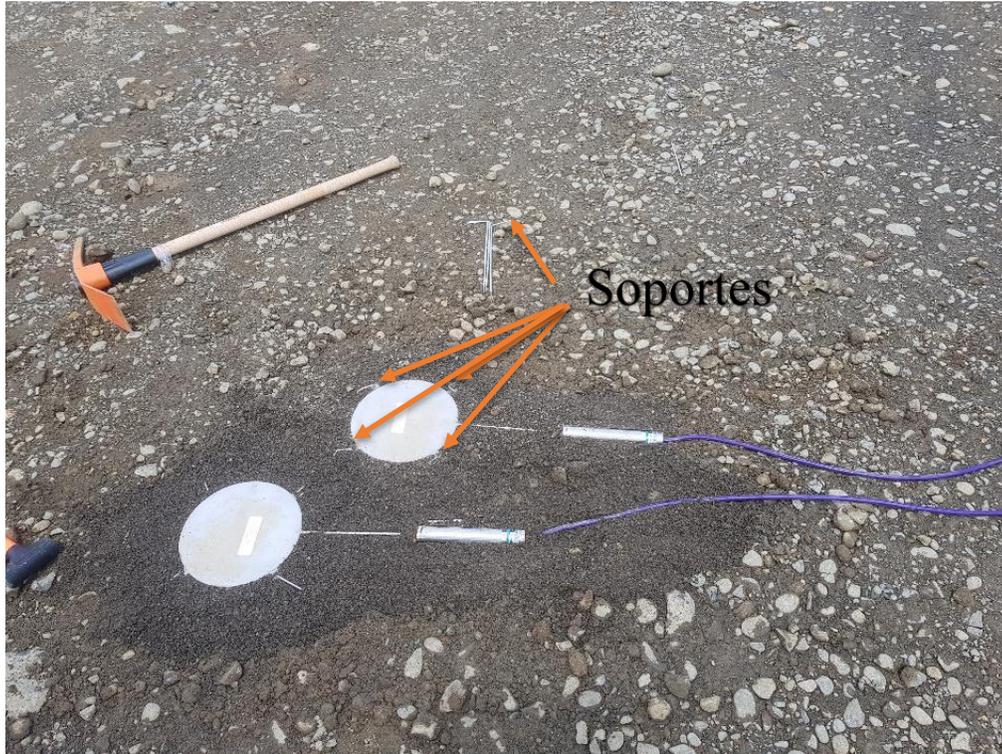
En el caso de los pavimentos flexibles y semirrígidos, que llevan instrumentación en capas granulares y en la mezcla asfáltica, la etapa constructiva es mucho más crítica y perjudicial para los equipos. Es por este motivo que los cuidados deben extremarse y se debe garantizar redundancia de sensores, ya que, durante el proceso constructivo, algunos pueden dañarse y ciertas etapas, como la compactación, pueden limitar la capacidad máxima de medición y afectar su durabilidad en el mediano plazo.

En el caso de las celdas de presión es muy importante asentar los sensores sobre una cama del material del sitio tamizada (con espesor aproximados de 25 mm) y otra de arena fina lavada y tamizada (con espesor aproximada de 25mm). Esto para evitar que la grava pueda aplicar cargas punzantes sobre las placas de metal y dañarlas, de igual forma debe repetirse este proceso después de instalado el sensor para colocar encima la capa de arena y luego material del sitio tamizado. Con esto se evita que algún material con sobre tamaño quede en contacto con la instrumentación.

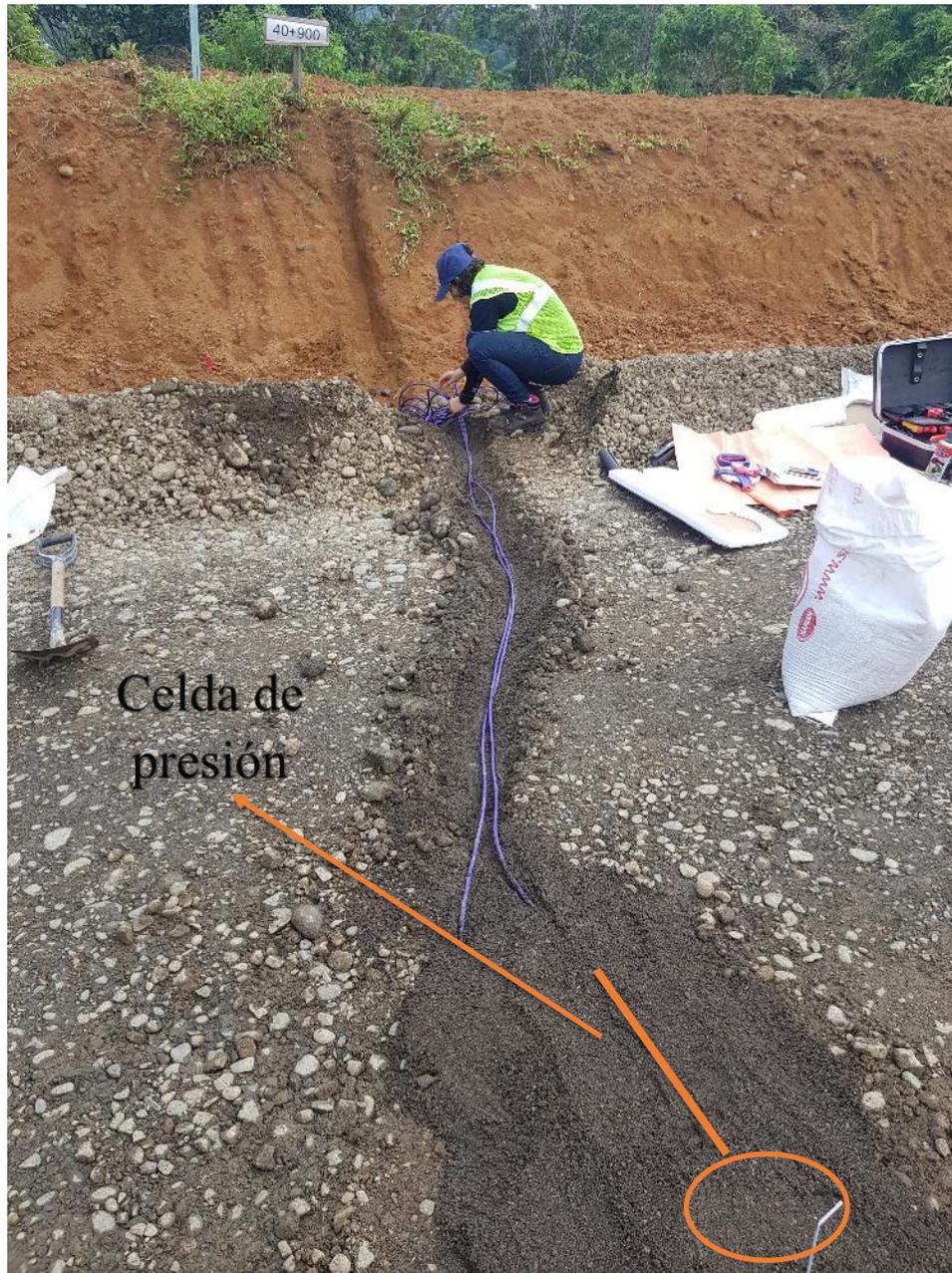
Durante la etapa de colocación de la subbase o base, es necesario remover, de forma manual, cualquier material con exceso de tamaño que se coloque sobre el sensor (al menos 10-15 cm de espesor). Después de esto se puede continuar con el proceso de extendido y compactación de la base, según la práctica común.

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 27 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------

En la Figura 11 y Figura 12 se muestran dos celdas de presión a nivel de subrasante (relleno), con su respectiva cama y posterior recubierto ambas de arena, además, los fijadores y soportes para evitar desplazamientos de las celdas.



**Figura 11.** Instalación de celdas de presión sobre “cama” de arena



Celda de  
presión

**Figura 12.** Recubrimiento de celdas de presión con arena

Es importante que, durante la etapa de planificación e instalación, se lleve un registro de la instrumentación colocada e incluso, una muy buena opción, es el replanteo de puntos utilizando topografía, para garantizar la ubicación final de estos.



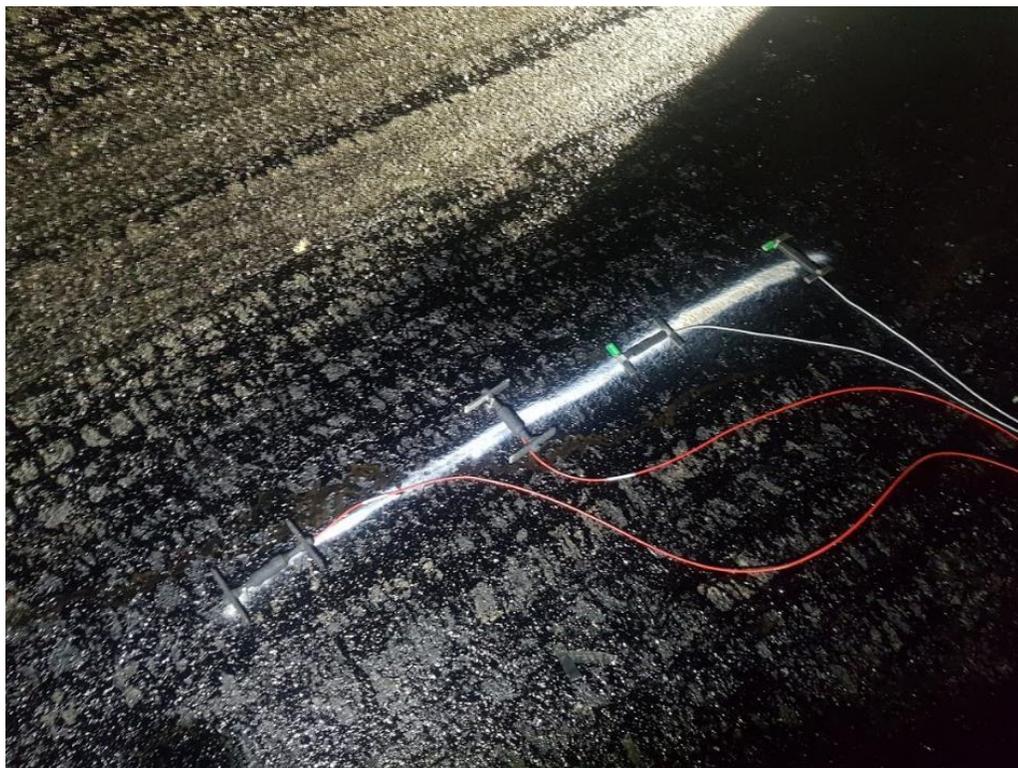
El registro de cada sensor es de vital importancia ya que cada uno de ellos posee constantes de calibración específicas, que permite transformar variables como voltaje o resistencia en medidas ingenieriles como presión y deformación, utilizando modelos matemáticos propios de cada fabricante (ver *Figura 13*).



**Figura 13.** Registro de etiquetas y códigos de los sensores

Para las galgas extensiométricas el procedimiento es similar, sólo que los sensores son asentados sobre “camas” de mezcla asfáltica del proyecto, tamizada en sitio, este proceso debe realizarse de forma cuidadosa, debido a la temperatura del material y a que el objetivo principal es lograr que las galgas extensiométricas, que tienen forma de “H”, queden debidamente embebidas en la capa de mezcla asfáltica por analizar.

En la *Figura 14* se puede observar la ubicación preliminar de las galgas en la huella externa del carril externo del proyecto Abundancia-Florencia en la Ruta Nacional N° 35, ubicado en el cantón de San Carlos. En la *Figura 15*, se muestra el proceso de tamizaje de la mezcla en caliente, la cual será utilizada para asentar y recubrir los sensores en su totalidad, antes de que la pavimentadora coloque la totalidad de la capa de mezcla asfáltica.



**Figura 14.** Ubicación preliminar de los sensores (huella de los vehículos, según planos constructivos)

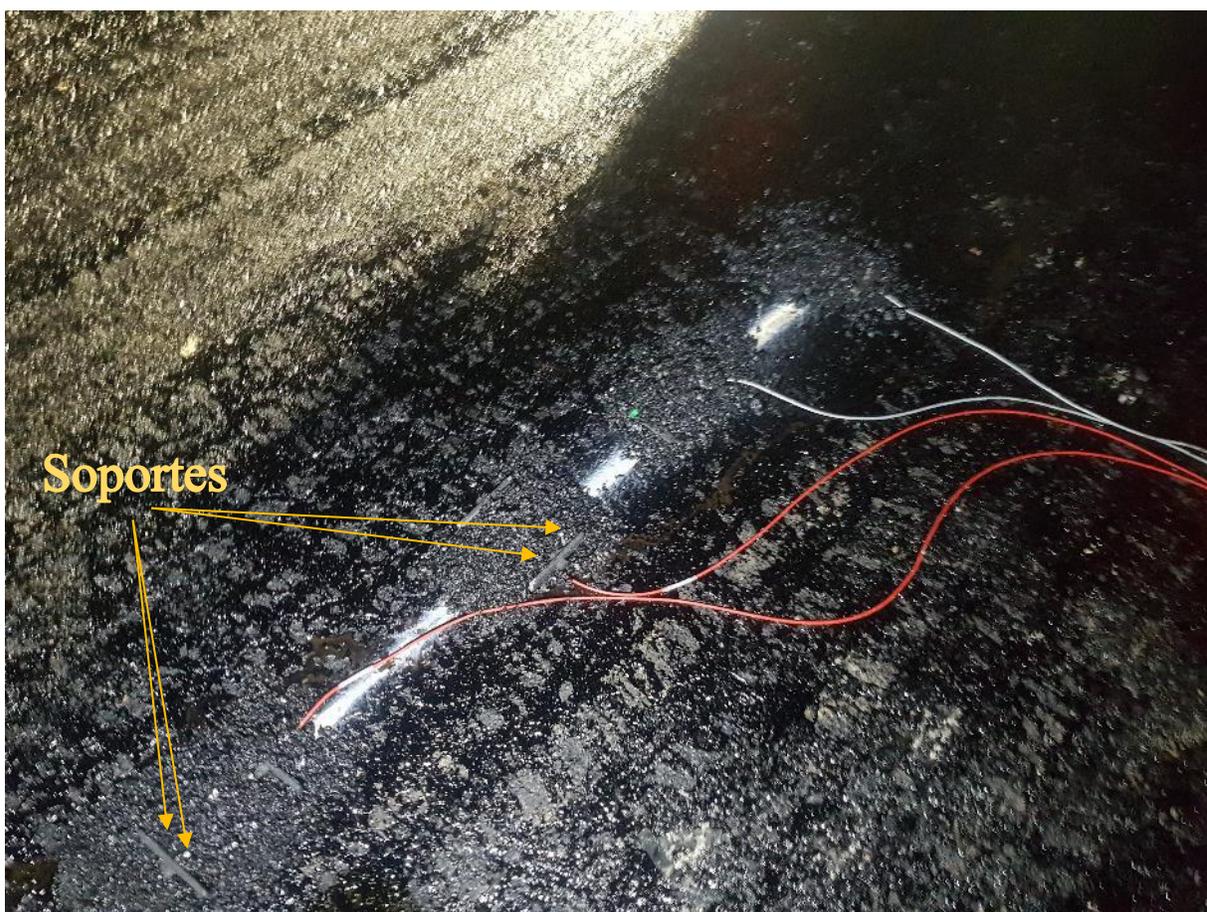


**Figura 15.** Tamizaje de mezcla caliente, para protección de galgas extensiométricas en mezcla asfáltica



Las galgas deben ser apoyadas correctamente sobre mezcla tamizada, evitando espacios vacíos y diferencias de elevación. Se deben colocar apoyos en la dirección opuesta a la medición, para evitar que el dispositivo se desplace de la zona durante su preparación o durante el tránsito de la pavimentadora.

En esta etapa también es importante proteger los cables de paso de maquinaria pesada, en la *Figura 16* y *Figura 17* se muestran unas galgas en proceso de recubrimiento con mezcla tamizada, antes del paso de la pavimentadora.



*Figura 16.* Protección de las galgas, con mezclas fina, tamizada en sitio



**Figura 17.** Protección de las galgas, con mezclas fina, tamizada en sitio previo a la colocación de la mezcla asfáltica

Es muy importante que después de instalada la instrumentación, la ubicación de esta se identifique adecuadamente, con marcas físicas y coordenadas geográficas para posterior seguimiento (ver *Figura 18*) y verificación de integridad.



**Figura 18.** Identificación para seguimiento

En las etapas de medición, ya sea en estaciones permanentes o móviles, el registro de respuestas se complementa con material audiovisual, principalmente en las etapas de verificación de la instrumentación, esto con el objetivo de verificar los equipos, revisando los pulsos, tipo de vehículo y magnitud de las respuestas.

En la *Figura 19* se muestran unas fotografías, donde se puede ver parte de los equipos complementarios utilizados para la verificación en campo. Si bien el equipo utilizado puede capturar datos de manera “autónoma”, es indispensable garantizar que los datos obtenidos son los adecuados en frecuencia, forma y magnitud.

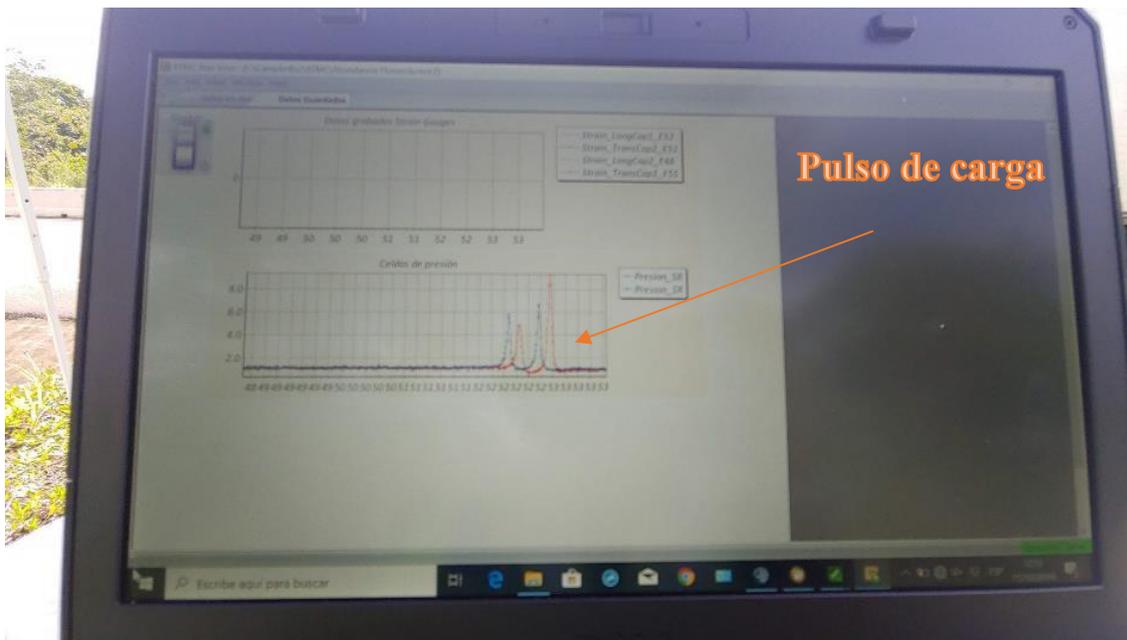
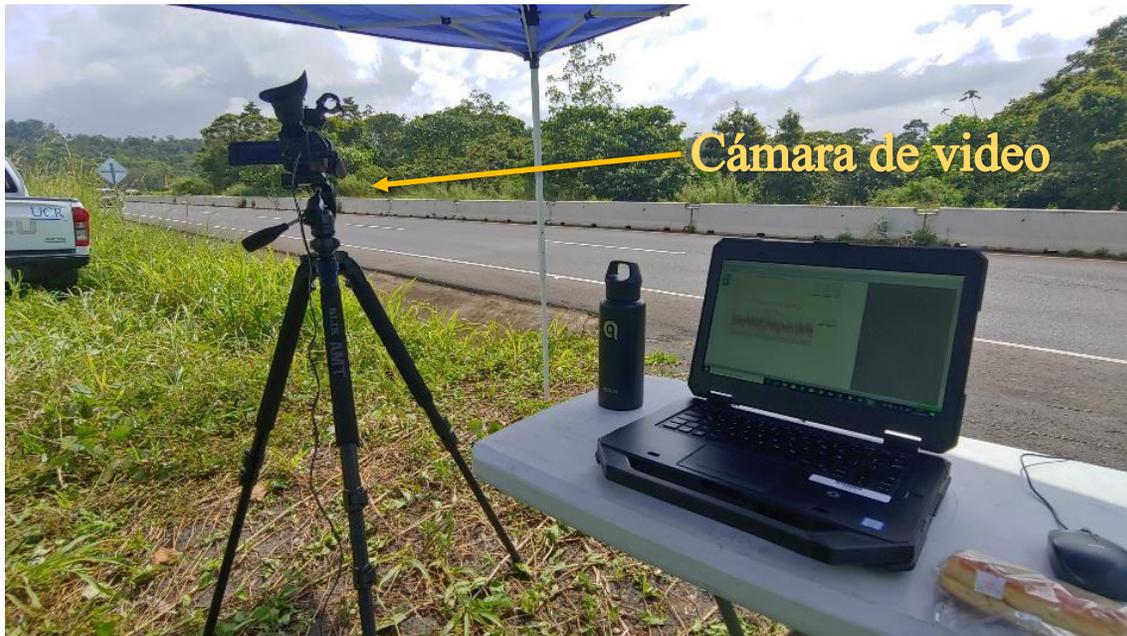


Figura 19. Verificación de los datos e integridad de los sensores



### 2.2.2 Equipo para monitoreo de respuestas en pavimentos

Los equipos utilizados para la captura de señales y respuestas asociados con instrumentación son dispositivos electrónicos muy precisos, cuyo principal objetivo es capturar señales eléctricas provenientes de sensores para diferentes aplicaciones, interpretar estas señales, almacenarlas y comunicarlas a un centro de información.

En la Figura 20 se muestra un ejemplo de diferentes dispositivos que componen un sistema de adquisición de datos. Este sistema es modular y puede ser ensamblado en función de la demanda y ubicación del sistema.

El equipo está constituido por diferentes componentes que serán explicados en posteriores secciones, pero es importante destacar que cuenta con: un sistema central que captura los datos y controla el resto de dispositivos (CR6), una batería de respaldo en caso de pérdida temporal de corriente eléctrica, un módulo para mediciones a alta velocidad que también sirve para ampliar la cantidad sensores disponibles y por último un modem 4G-3G para comunicación vía internet con los dispositivos, ya sea para ajustar la configuración o para descarga de los datos.

El equipo que se muestra en la Figura 20 ha sido utilizado para captura de respuestas en una losa de concreto del AIJS, adicionalmente, se muestra la cámara utilizada para identificar y revisar las respuestas obtenidas sobre la losa de concreto y confirmar que las mismas sean de aeronaves.

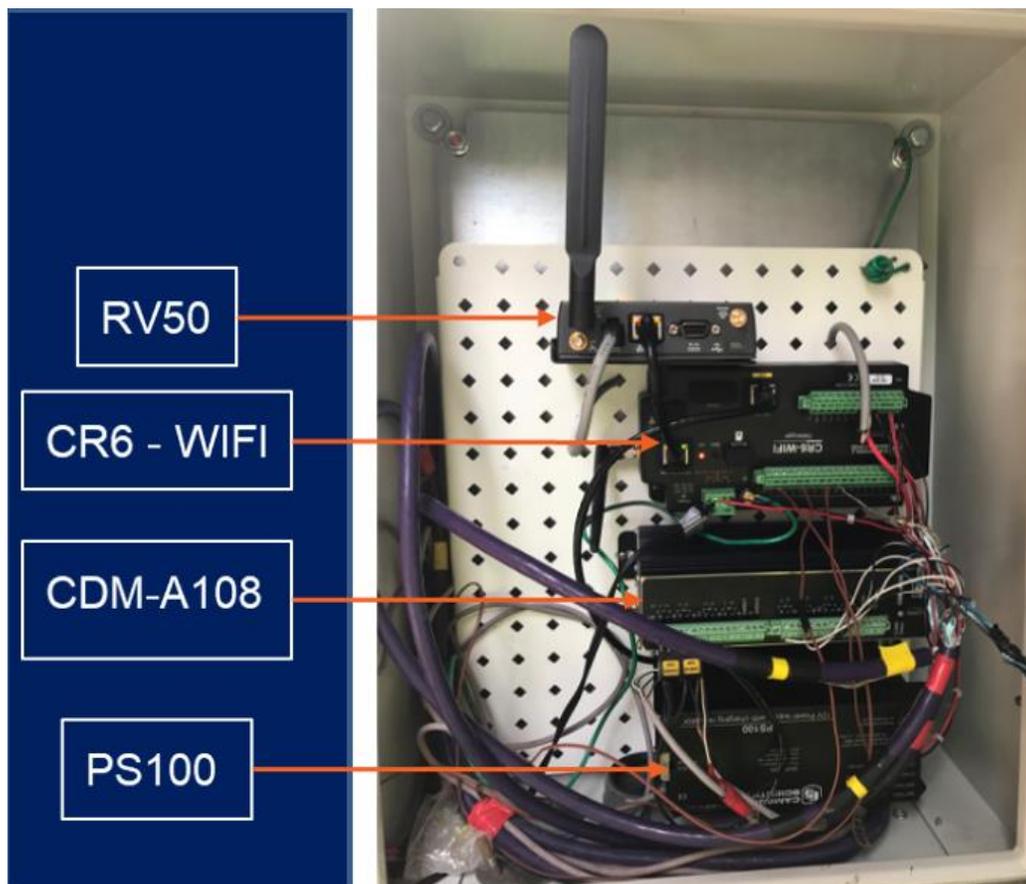


Figura 20. Sistema de adquisición de datos remoto, ubicado en la puerta 3 del AIJS



Figura 21. Cámara para asociación de respuestas, ubicada hacia la puerta 3 del AIJS



En la Figura 22 se muestra otro ejemplo de equipo utilizado en este caso para determinar respuestas en el pavimento flexible, sólo que en esta ocasión el equipo se encuentra en una zona de más de difícil acceso, por lo tanto, se encuentra protegido con una caja acrílica con protección a la humedad. Además, cuenta con un panel solar para independencia de alimentación eléctrica, así como otros dispositivos para protección a la intemperie, como sensores de humedad interna y reguladores de voltaje.

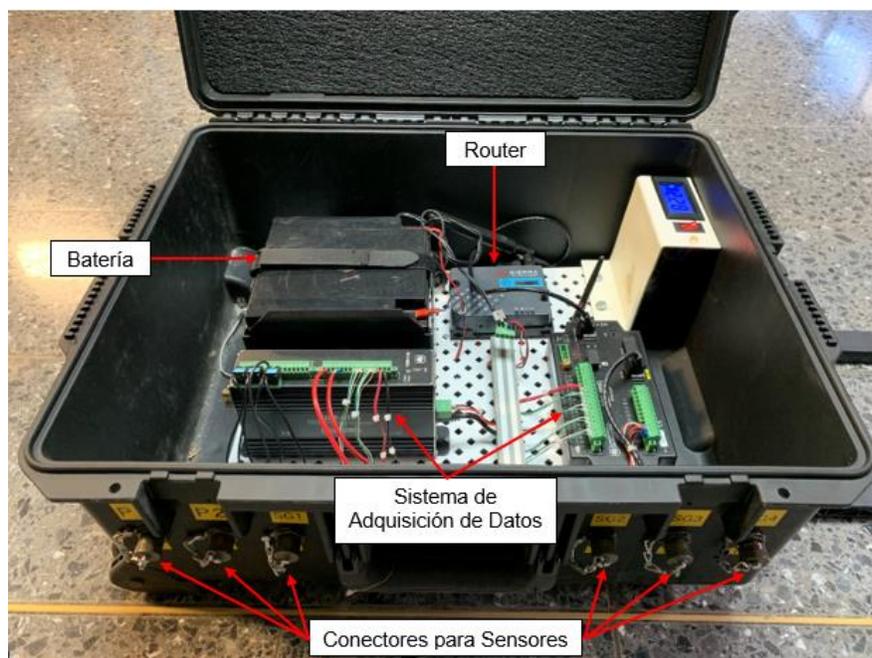


**Figura 22.** Sistema de adquisición de datos remoto, ubicado en el conector bravo del AIJS

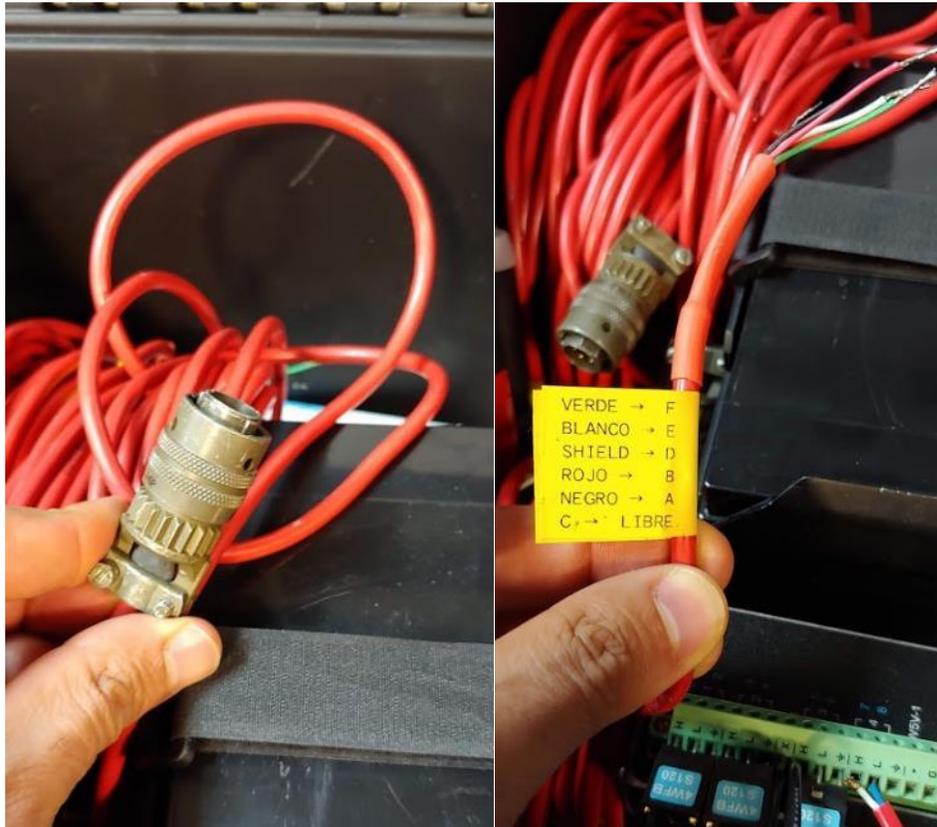
Los equipos de monitoreo remoto son una opción asequible y confiable para zonas de difícil acceso, que permiten comunicación vía internet, tanto para ajustes como para revisar la información, lo que permite mayor eficiencia del personal, al tener centralizado el acceso a los equipos de forma remota.

Sin embargo, los equipos deben quedar confinados en un solo lugar, lo cual sólo es conveniente para mediciones a largo plazo. Por este motivo también se cuenta con un equipo de las mismas capacidades, pero portátil.

Este equipo se muestra en la Figura 23, y es utilizado para mediciones sobre la red vial nacional, en sitios donde se cuenta con instrumentación que se revisan de forma física para la captura de respuestas. Este cuenta con los mismos componentes de la Figura 20, pero con las ventajas de disponer de un batería de mayor capacidad para soportar las jornadas de medición en campo (8 horas) y conectores de grado militar para un rápido ensamblaje y conexión hermética en sitio (ver Figura 24).



**Figura 23.** Sistema de adquisición portátil



**Figura 24.** Conector militar utilizado, para el equipo de la Figura 23

Adicionalmente a los equipos anteriores, también se han de instalar próximamente, equipos complementarios. Estos equipos permitirán, por ejemplo, obtener variables climáticas en sitios de interés, complementando las mediciones estructurales con registros en tiempo real de la humedad en capas intermedias de los pavimentos.

Lo anterior facilitará recopilar datos y analizar como las variables climáticas externas afectan el comportamiento mecánico de los materiales en sitio. Esto permitirá complementar otros proyectos asociados con la variación estacional de módulos e incluso servir de referencia para la calibración de las curvas agua-suelo (SWCC), donde conocer los regímenes de humedad en suelos nacionales es de sumo valor. En la Figura 25, se puede observar esta estación durante la fase de pruebas en el LanammeUCR.



**Figura 25.** Estación meteorológica compacta para registro de humedad de suelos

En las siguientes secciones se describen los equipos y módulos utilizados, así como sus principales aspectos técnicos (en el Anexo A se enlistan las fichas técnicas de los equipos).

#### 2.2.2.1 Enlace celular industrial 4G LTE (RV50)

Este equipo es un enlace celular industrial 4G LTE que proporciona conectividad serial y Ethernet a numerosas redes celulares (ver Figura 26). El enlace 4G vuelve automáticamente a 3G o 2G cuando la cobertura 4G no está disponible. Soporta redes LTE, CDMA / EV-DO y GSM / GPRS / EDGE / WCDMA. La red y el operador utilizados por el equipo están determinados por las tarjetas SIM activas insertadas en el dispositivo, este dispositivo permite hasta dos tarjetas SIM, sin embargo, solo puede utilizarse una a la vez.

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 41 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



**Figura 26.** Enlace celular industrial 4G LTE (RV50)

Fuente: (Campbell Scientific, 2017)

#### Beneficios y características:

- Proporciona conectividad a Internet para registradores de datos y periféricos en cualquier lugar donde haya cobertura de red celular.
- Muy bajo consumo de energía en comparación con otros enlaces celulares industriales.
- Compatible con la mayoría de los registradores de datos.
- Redes 4G LTE con respaldo automático a 3G y 2G.
- Listo para usar de fábrica, no es necesario trabajar con un proveedor de servicios celulares para el aprovisionamiento de módem y planes de datos.

#### 2.2.2.2 Cámara de campo de observación y vigilancia exterior (CCFC)

Es una cámara con un enfoque de alta resolución y calidad, diseñada específicamente para aplicaciones remotas en exteriores. Captura fotos y videos de alta calidad en gran ángulo y enfoque durante el día y la noche (Figura 27).

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 42 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



**Figura 27.** Cámara CCFC

Fuente: (Campbell Scientific, 2017)

#### Beneficios y características:

- Lente de enfoque óptico de 18x.
- Lente de enfoque automático.
- Hasta 15 posiciones de lente preestablecidas.
- LEDs infrarrojos para fotos nocturnas (captura imágenes en casi cualquier condición de iluminación)
- Capacidad de captura de imágenes de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).
- Interfaz web fácil de usar.
- Controlado por temporizador interno, detector de movimiento, página web o registrador de datos.
- Descongelador de ventana.
- Cuerpo de cámara anodizado tipo 3 que permite su uso en entornos corrosivos.
- Amplio rango de temperatura (-40 ° a + 60 ° C).

### 2.2.2.3 Módulos de Medición Analógica de alta velocidad (CDM-A108 y CDM-A116)

El CDM-A108 y el CDM-A116 son módulos de entrada analógica de 24 bits, que aumentan significativamente la cantidad de canales analógicos en un sistema de registro de datos. El CDM-A108 tiene ocho canales diferenciales y el CDM-A116 tiene 16 canales diferenciales.

Cuentan con un convertidor analógico a digital de 24 bits y un frontal analógico de bajo ruido para proporcionar mediciones analógicas de alta resolución. También pueden realizar mediciones simultáneas, admitir mediciones promedio de un período e incluir canales de excitación de corriente y voltaje.



**Figura 28.** Módulos de medición analógica

Fuente: (Campbell Scientific, 2016)

#### Beneficios y características

- 8 entradas diferenciales o 16 entradas unipolares en el CDM-A108.
- 16 entradas diferenciales o 32 entradas de un solo extremo en el CDM-A116.
- Posibilidad de realizar mediciones simultáneas.

- Frecuencia de muestreo multiplexada máxima de 3,0 kHz utilizando un ajuste de entrada rápido (100  $\mu$ s).
- Frecuencia de muestreo de ráfaga máxima de 30 kHz.
- ADC sigma-delta de 24 bits con 16 frecuencias de muesca programables por el usuario de 30000 Hz a 2,5 Hz, incluidos los filtros de 50 y 60 Hz.
- Rangos de entrada de  $\pm 5000$  mV,  $\pm 1000$  mV y  $\pm 200$  mV.

#### 2.2.2.4 Registrador de datos de medición y control (Serie CR6)

Es un componente central para un sistema de adquisición de datos. Combina características de múltiples registradores de datos como: comunicaciones más rápidas, consumo de baja potencia, USB incorporado, tamaño compacto, precisión y resolución de entrada analógica y digital (ver Figura 29).



**Figura 29.** Registrador de datos CR6

Fuente: (Campbell Scientific, 2020)

Beneficios y características:

- Terminales “U” configurables a lo que se requiera: analógico o digital, entrada o salida.
- Mediciones de cuerda vibrante estático.
- Protección contra sobretensiones en todos los terminales.

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 45 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



- Entrada de alimentación flexible desde el panel solar, fuente de alimentación, batería de 12 V y USB.
- Las opciones de comunicación incluyen Ethernet, Wi-Fi y USB.
- El cableado a través de un bloque de terminales extraíble.
- Incluye canales de entrada de corriente no aislados para conectar directamente sensores con salidas de corriente de 0 a 20 mA o de 4 a 20 mA.
- Unidad de tarjeta microSD para requisitos de memoria extendida.
- Soporte de sensores en serie con RS-232 y RS-485 nativo.
- CPI para alojar sensores de alta velocidad y módulos distribuidos (CDM).
- Programable con el generador de programas CRBasic compatible con el protocolo PakBus.

### 2.2.3 *Equipo para el monitoreo remoto de variables climáticas*

Este equipo de igual forma es ensamblado a medida, en función de las necesidades planteadas y objetivos del proyecto. Posee compatibilidad con los equipos anteriores y esta creado para ser instalado sobre algunos sitios de la RVN de Costa Rica, con diferentes regímenes de humedad y temperatura.

Permite captura de datos climáticos de interés y a la vez posee compatibilidad con otros sensores utilizados, como, sensores de humedad para materiales que componen la estructura del pavimento (ver Figura 30)

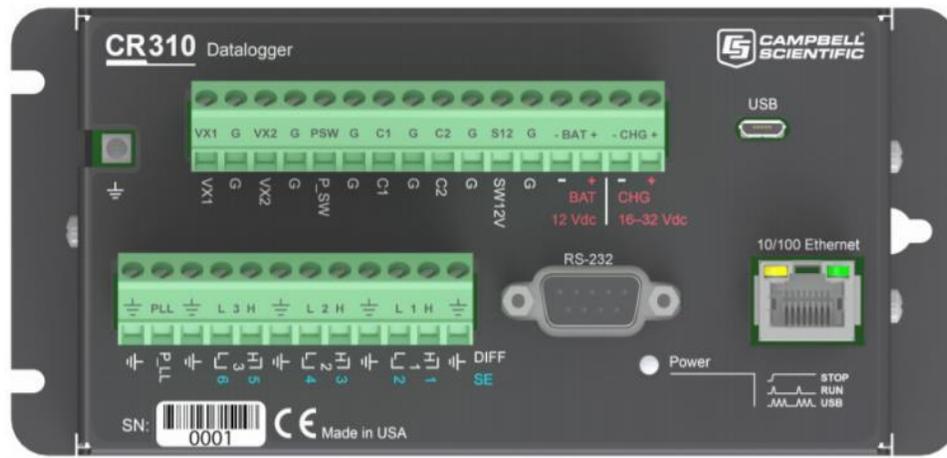


**Figura 30.** Estación climática compacta propiedad del LanammeUCR

### 2.2.3.1 *Equipo central de toma de datos (CR310)*

El CR310 es un registrador, controlador y medidor de datos multipropósito compacto, que incluye un puerto ethernet y conectores de terminales removibles. Este registrador de datos de nivel básico puede medir la mayoría de los sensores hidrológicos, meteorológicos, ambientales e industriales.

Permite guardar los datos, haciéndolos disponibles en varias redes. El CR310 también realiza una toma de datos automatizada en sitios remotos, este equipo funciona para aplicaciones pequeñas que requieren monitoreo y control remoto a largo plazo (ver Figura 31).



**Figura 31.** Registrador de datos compacto con ethernet (CR310)

Fuente: (Campbell Scientific, 2020)

Beneficios y características:

- Se configura fácilmente con software de PC y conectividad USB.
- Mide con sensores digitales y analógicos confiables.
- Listo para Internet: correo electrónico, FTP, HTTP / web, TCP, con los complementos necesarios.
- Puerto Ethernet integrado.
- Modem 3G integrado.
- El cableado es fácil a través del bloque de terminales extraíble.



### 2.2.3.2 Baterías

Los equipos utilizan baterías recargables de 12 VDC de al menos 7 Amperios-hora, compatibles con los registradores de datos de la serie CR6 o CR300.

### 2.2.3.3 Sensor meteorológico compacto (ClimaVUE 50)

El ClimaVUE 50 es un sensor meteorológico todo en uno, que satisface las necesidades comunes de monitoreo del clima. Este sensor utiliza SDI-12 para reportar la temperatura del aire, la humedad relativa, la presión de vapor, la presión barométrica, el viento (velocidad, ráfaga y dirección), la radiación solar, la precipitación y la caída de rayos (conteo y distancia).

Un sensor de inclinación incorporado garantiza la integridad de los datos a largo plazo y es ideal para una implementación rápida en ubicaciones remotas (ver Figura 32).



**Figura 32.** ClimaVUE 50

Fuente: (Campbell Scientific, 2019)

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 49 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



Beneficios y características:

- Mediciones meteorológicas comunes con una salida digital simple (SDI-12).
- Consumo de energía promedio de menos de 1 mA, lo que lo hace conveniente para sitios con energía solar.
- El sensor de inclinación integrado ayuda a asegurar que el sensor se mantenga nivelado con el tiempo.
- Bajo mantenimiento, no hay piezas móviles que reducen significativamente el tiempo y el costo de mantenimiento.
- No se requiere configuración del sensor.
- Diseño compacto para una instalación rápida y de bajo impacto.

Todos los sensores están integrados en una sola unidad de forma pequeña, con un diseño compacto y sin piezas móviles, a continuación, se detallan algunos de ellos.

Tabla 3. Sensores incorporados en el Clima VUE50

Sensor	Descripción
Piranómetro	La radiación solar se mide mediante un piranómetro que está integrado en el borde del embudo del pluviómetro en la parte superior del ClimaVUE 50. El piranómetro en miniatura utiliza un sensor de celdas de silicio para medir la radiación solar entrante (directa y difusa) total. Los sensores de celdas de silicio tienen un corto tiempo de respuesta para cambiar las condiciones de radiación y una sensibilidad admisible en todo el espectro solar.
Anemómetro	El espacio debajo del pluviómetro es donde el ClimaVUE 50 mide la velocidad del viento. Las señales ultrasónicas emitidas desde los transductores en ángulo recto entre sí rebotan en la placa de vidrio sinterizado poroso y regresan al sensor opuesto. La velocidad del sonido se ve afectada por el viento, y la velocidad del viento se calcula midiendo las



Sensor	Descripción
	diferencias en el tiempo que tarda el sonido en viajar desde los transmisores hasta los receptores.
Sensor de temperatura	<p>La medición de temperatura se realiza en el centro del área del anemómetro donde una pequeña aguja de acero inoxidable que contiene un pequeño sensor de temperatura (termistor) se extiende desde el medio de los cuatro transductores sónicos en el centro del anemómetro.</p> <p>A diferencia de la mayoría de las mediciones de temperatura del aire, el sensor de temperatura no está cubierto con placas con rejillas para protegerlo del calentamiento solar. En cambio, se sienta al aire libre, susceptible al calentamiento solar del cuerpo del instrumento. Sin embargo, el sensor corrige la temperatura del aire medida porque se conoce la radiación solar y la velocidad del viento. Estas dos son las principales variables que determinan el error entre la temperatura del aire medida y la temperatura real del aire. Luego se usa una ecuación de balance de energía para calcular cuál debería ser la temperatura real con una precisión de <math>\pm 0.6^\circ \text{C}</math>.</p>
Sensor de humedad relativa	<p>El sensor de humedad relativa está ubicado detrás de la pantalla circular de Teflon, cerca de los transductores sónicos. La pantalla de teflón protege el sensor del agua líquida y el polvo al tiempo que permite que el vapor de agua pase libremente al sensor. El sensor mide la humedad relativa y la temperatura y calcula la presión de vapor.</p>



Sensor	Descripción
Contador de goteo, pluviómetro	<p>El ClimaVUE 50 contiene un embudo de recolección de lluvia de 9,31 cm (3,67 pulgadas) de diámetro. Un resorte en el embudo actúa como un filtro para evitar la entrada de partículas grandes al tiempo que permite un flujo suficiente para que el agua no retroceda. La lluvia recogida por el embudo sale del embudo a través de un orificio acampanado de precisión que forma la lluvia en gotas de un tamaño conocido.</p> <p>El sensor cuenta los pulsos (gotas) y calcula el volumen de agua. A medida que aumenta la intensidad de la lluvia, las gotas se vuelven más pequeñas, pero el firmware del ClimaVUE 50 contiene un algoritmo para compensar automáticamente el tamaño de la gota a medida.</p>
Sensor de inclinación	<p>El uso principal de los datos del sensor de inclinación es asegurar que el ClimaVUE 50 permanezca nivelado en todo momento. Tres grados fuera del nivel pueden causar errores en las mediciones de lluvia y radiación solar.</p>

Fuente: (Campbell Scientific, 2019)

#### 2.2.3.4 Sensor de luz ultravioleta (SU-100-SS)

Este sensor percibe las longitudes de onda de 250nm a 400 nm (del espectro electromagnético), radiación ultravioleta (UV), que abarca el UV solar y el rango de lámparas eléctricas. Posee factores de conversión para un cambio de unidades y la electrónica y componentes están alojados en un cuerpo de aluminio anodizado (ver Figura 33).

Las opciones de salida analógica y digital están disponibles. La versión analógica es una salida de voltaje no amplificada, esta es la salida del existente en el LanammeUCR. Las aplicaciones incluyen: medición de radiación UV en ambientes exteriores y uso en laboratorio con fuentes de luz artificial (por ejemplo, lámparas germicidas).

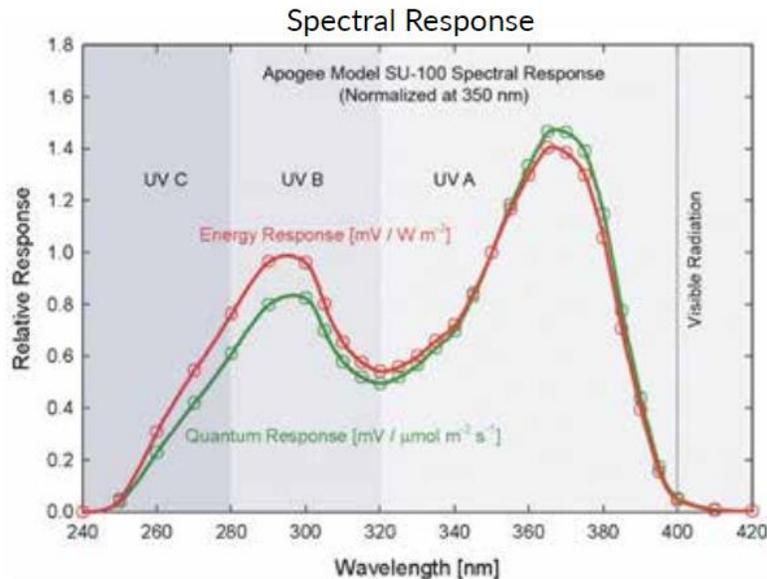
Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 52 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



**Figura 33.** Sensor ultravioleta SU-100-SS

Fuente: (Apogee Instruments, 2019)

Las mediciones de respuesta espectral se realizan en incrementos de 10 nm en un rango de longitud de onda de 200 a 450 nm en un mon cromador con una fuente de luz eléctrica conectada. Los datos espectrales medidos se normalizaron a 350 nm, ver Figura 34.



**Figura 34.** Respuesta espectral del sensor

Fuente: (Apogee Instruments, 2019)



En la siguiente tabla se muestran los porcentajes de error del sensor ante diferentes condiciones de medición.

**Tabla 4. Porcentajes de error del equipo**

Fuente de radiación (error calculado relativo al sol, cielo despejado)	Error [%]
Sol (cielo despejado)	0,0
Sol (cielo nublado)	< 0,5
Reflejado desde el dosel de hierba	< 0,5
Reflejado del dosel de hoja caduca	< 0,5
Reflejado del dosel de coníferas	< 0,5
Reflejado desde el suelo agrícola	< 0,5
Reflejado del suelo del bosque	< 0,5
Reflejado desde el suelo del desierto	< 0,5
Reflejado desde el agua	< 0,5
Reflejado de hielo	< 0,5
Reflejado de la nieve	< 0,5
Fluorescente blanco frío (T5)	9,0
Halogenuros metálicos	2,8
Sodio de alta presión	-1,7
Incandescente	-3,3
Arco de mercurio	17,8

Fuente: (Apogee Instruments, 2019)

### 2.2.3.5 Reflectómetro de contenido de agua del suelo (CS655)

El CS655 es un sensor multiparamétrico digital que mide contenido de agua volumétrica del suelo, la conductividad eléctrica en masa y la temperatura. Produce una señal SDI-12 y sus varillas cortas se pueden usar en suelos problemáticos (ver Figura 35).



**Figura 35.** Reflectómetro de contenido de agua en el suelo

Fuente: (Campbell Scientific, 2018)

Beneficios y características:

- Un volumen de muestra amplio.
- Medición corregida por los efectos de la textura del suelo y la conductividad eléctrica.
- Estima el contenido de agua del suelo para una amplia gama de suelos minerales.
- Sensor versátil: mide la permitividad dieléctrica, la conductividad eléctrica del bulbo (CE) y la temperatura del suelo.

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 55 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



Consta de dos varillas de acero inoxidable de 12 cm de largo conectadas a una placa de circuito impreso. La placa de circuito está encapsulada en epoxi y se conecta un cable blindado a la placa de circuito para la conexión con el datalogger.

### 2.3 *Comunicación con los equipos*

El software utilizado para este propósito es un paquete informático de administración y soporte para el datalogger que proporciona comunicaciones, edición de programas, configuración, recogida de datos y visualización, conocido como “Loggernet”.

En este software, se puede configurar los sistemas de adquisición de datos para establecer una comunicación alámbrica o inalámbrica con una computadora. Las conexiones inalámbricas son las utilizadas para el monitoreo remoto, y pueden ser configuradas para generar un intercambio de información vía internet, ya sea mediante una red pública (IP pública) o mediante una red privada (VPN).

La conexión por red pública es un intercambio de información mediante un enlace con la casa matriz (utilizando un protocolo llamado pakbus). La conexión por VPN (Virtual Private Network), es un intercambio directo de información entre el modem en el sitio y el computador en la oficina, en el Anexo B.1 se muestra el paso a paso de se configuran estos equipos.

### 2.4 *Programación de los equipos (CRBasicEditor)*

Todos los equipos para monitoreo remoto de respuestas en pavimentos, citados en los apartados anteriores, deben programarse previo a su uso, captura de señales y almacenamiento de información. El *CRBasicEditor* es una herramienta, que pone a disposición la casa matriz del equipo en su aplicación LoggerNet, con una gran variedad de apartados que facilitan la escritura de un programa funcional de registro de datos en lenguaje de programación.

El entorno *CRBasicEditor* ofrece un ambiente con múltiples ventanas e indicadores para sus parámetros. Además, este compilador posee un sistema de ayuda en línea que brinda información de funciones y sus respectivas descripciones, para que así, si es necesario, puedan ser utilizadas por los usuarios en sus respectivos proyectos.

Por otra parte, *CRBasicEditor* posee la ventaja de ofrecer programas de ejemplo para cada instrucción, los cuales pueden ser modificados y adaptados al sensor que se desea poner en funcionamiento (Campbell Scientific, 2017).

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 56 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------

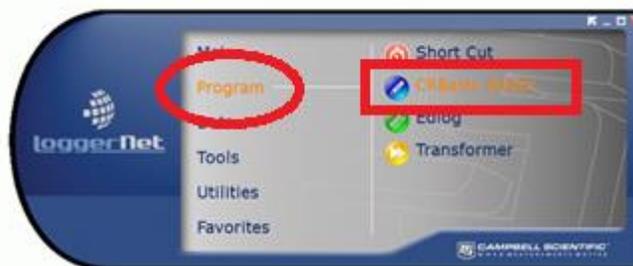


El CRBasicEditor posee ciertas características y ventajas que lo diferencian de otros compiladores. Los principales atributos de este lenguaje de programación, según Campbell Scientific (2013), se muestran a continuación.

- Entorno de programación de ventanas múltiples.
- Sintaxis personalizable para palabras clave, variables, cadenas y comentarios del programa.
- Precompilador para verificar la sintaxis. Esta muestra advertencias detalladas con un mensaje de error si se presenta un problema en el código.
- Listas de instrucciones y funciones, las cuales se pueden utilizar libremente, para programas de registro de datos.
- Amplia base de datos con instrucciones y ejemplos de programas de registro de datos.
- Compilación condicional aplicable al registro de datos.

El lenguaje que se utiliza en el CRBasicEditor está destinado a programadores experimentados para el registro de datos ya que brinda una amplia flexibilidad. Al utilizar instrucciones y funciones relacionadas al registro de datos, se necesita de un amplio conocimiento del significado y funcionalidad de las variables. Sin embargo, la sintaxis, flujo de programa, lógica, funciones matemáticas, operadores y enunciados lógicos son similares a los encontrados en sistemas de programación básicos como Python y Java.

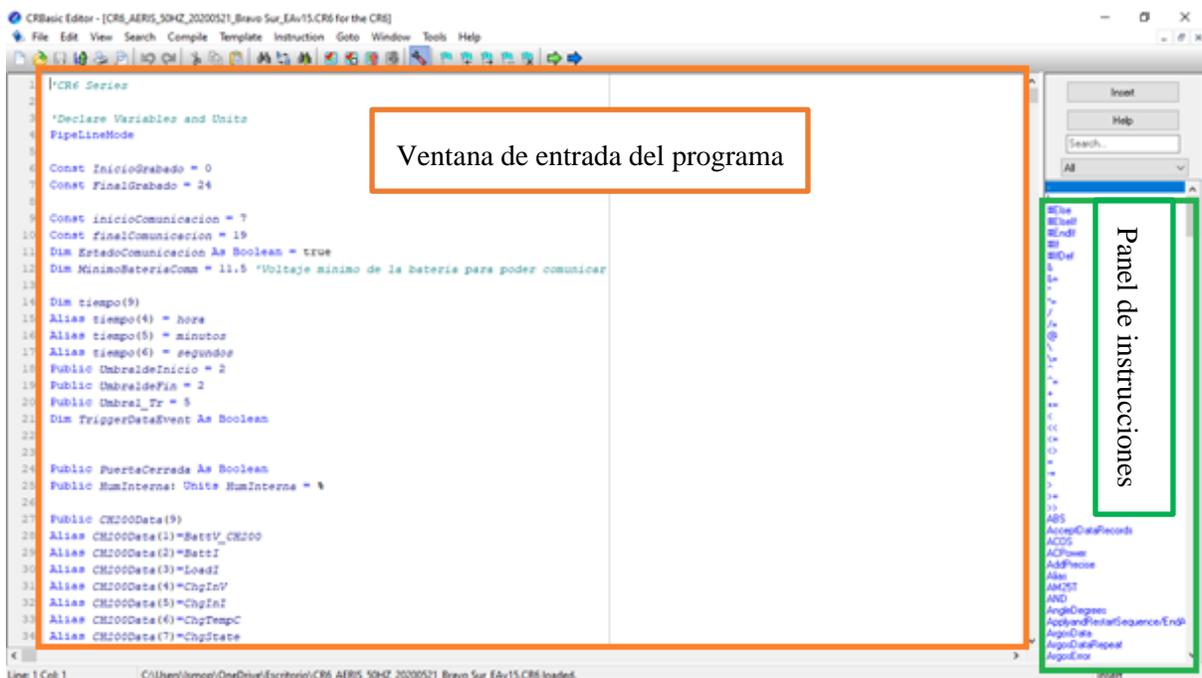
Para ingresar al CRBasicEditor, se debe acceder a la aplicación de LoggerNet. En esta, se desplegará una serie de opciones como las mostradas en la Figura 36. En el apartado “Program”, debe seleccionar la opción “CRBasic Editor”.



**Figura 36.** Ingreso al CRBasic Editor

Fuente: (Campbell Scientific, 2015)

Una vez dentro del compilador, se desplegará una pestaña como la mostrada en la Figura 37. Esta será la pestaña principal del CRBasicEditor, la cual se divide en 2 partes. Primero, se encuentra la “Ventana de entrada del programa”, donde se escribe y edita el código de interés. En segundo lugar, se encuentra el “Panel de instrucciones”, que será una lista de instrucciones del CRBasic para un uso específico del DataLogger. Estas listas de instrucciones pueden ser directamente seleccionadas en esta ventana o escritas en la ventana de entrada del programa.



**Figura 37.** Ventana principal del CRBasic Editor

Como principal ventaja es su amplia flexibilidad y su universalidad, ya que los equipos y sensores pueden configurarse con una alta personalización; como desventaja es que hasta para encender el equipo y las funciones básicas de comunicación, hay que compilar una secuencia de código, por lo que se requiere de usuarios experimentados, con conocimientos básicos en programación.

En el anexo B.2, se muestra un ejemplo de código utilizado en una estación permanente (AIJS), para un pavimento flexible. Este se encarga de administrar el encendido del equipo, reglas de encendido y apagado del modem, monitorear la batería y carga externa del panel solar, humedad interna, así como



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

gestionar la frecuencia de medición de cada sensor por eventos (después de que un eje activa el sistema de medición), para finalmente almacenar la información en las respectivas tablas creadas. Estas tablas son transferidas a la oficina mediante solicitudes de usuario para posterior análisis.

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 59 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



### 3 RESULTADOS OBTENIDOS

La implementación del programa DPLP-CR, como parte de la investigación realizada por el LanammeUCR, permitirá una recolección sostenida a través de los años de valiosa información. La información obtenida de tramos instrumentados, incluidos los tramos DPLP-CR, brindan información que podrá ser utilizada en investigaciones futuras y complementar otros proyectos de investigación.

La información recolectada de estos sistemas de información es revisada, validada y almacenada junto con información valiosa del desempeño de pavimentos, como lo son: la auscultación de deterioros superficiales, medición del cuenco de deflexiones, así como indicadores de regularidad y fricción de los pavimentos, más detalles se pueden consultar en el informe LM-PI-UIIT-114-2020-R1.

#### 3.1 Prueba de carga

El procedimiento de diseño mediante las guías mecánica empírica, difieren de las metodologías actuales de tal forma que el fin no es hallar solo espesores que conformarán el pavimento, sino, la predicción del desempeño que tendrá la estructura bajo las condiciones propias del sitio donde será construida.

Para lograr esta predicción del desempeño, el procedimiento de diseño inicia con la recolección de la información correspondiente a las características de tránsito de la zona, propiedades de los materiales propuestos para el pavimento y las condiciones climáticas locales. Estos son los parámetros de entrada necesarios para realizar un diseño mecánico – empírico (Loría, 2013).

Parte del proceso de elaboración de la Guía de Diseño Estructura Mecánica Empírica de Pavimentos, corresponde a la calibración de las ecuaciones y modelos matemáticos de predicción de desempeño adaptadas a las condiciones nacionales. Para lograr lo anterior, se monitorean los cambios que presenta el pavimento a lo largo de su vida útil, en donde, este monitoreo es realizado mediante la instrumentación del pavimento con sensores que recopilan la información de interés para generar estas ecuaciones y modelos matemáticos.

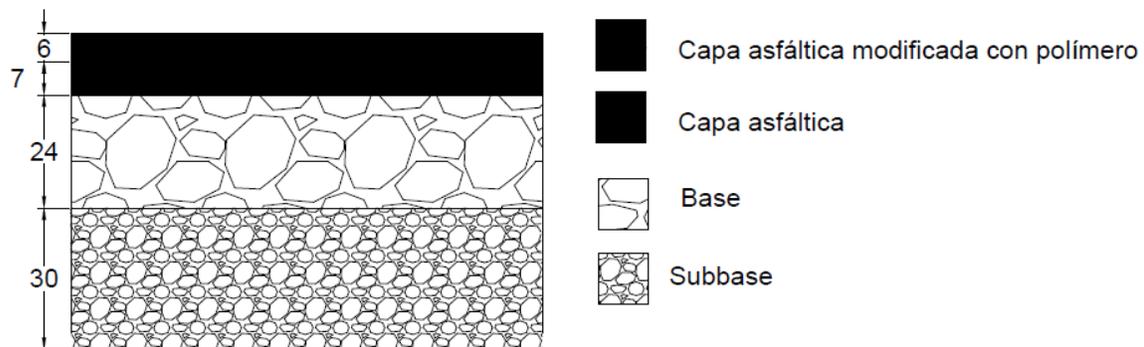
En la presente sección se muestra una prueba de carga en condiciones controladas, donde se miden las respuestas de un pavimento bajo cargas conocidas para después comparar valores mediante modelación por el método de multicapa elástica.

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 60 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------

### 3.1.1 Modelación de pavimentos

La modelación de pavimentos consiste en la estimación de las respuestas mecánicas (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) de un pavimento ante cargas externas, como por ejemplo las cargas de tránsito, utilizando algunos procedimientos matemáticos, como la teoría de Odemark-Boussinesq, multicapa elástica o elemento finito.

La estructura de pavimento analizada posee 5 capas y un espesor total de 67 cm (ver Figura 38) y está compuesta por: una capa de mezcla asfáltica en caliente (MAC) modificada con polímero, una MAC densa convencional, una capa de base estabilizada con cemento, una capa de subbase, y la subrasante (compuesta por un relleno de sustitución y suelo).



**Figura 38.** Espesores de la estructura analizada

Esta estructura se encuentra ubicada en el tramo número 26, del proyecto DPLP-CR (Arias, 2020), en la Ruta Nacional N° 35, entre los poblados de Ciudad Quesada y Florencia, del Cantón de San Carlos. Es una ruta relativamente nueva pues entró en operación en el año 2018, debido a esto fue posible instalar instrumentación desde el nivel de subrasante.

Para realizar una correcta comparación de los valores medidos vs los modelados y poder obtener una modelación representativa, es necesario efectuar una estimación adecuada de la capacidad mecánica de los materiales en sitio. Para poder generar esta estimación, es imprescindible disponer de ensayos de laboratorio adecuados y datos del día de la medición.

La mezcla asfáltica es considerada como un material viscoelástico para las temperaturas de trabajo más comunes de las carreteras en Costa Rica (15 °C – 60 °C). Esto indica que la capacidad mecánica del

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 61 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



material, asociada a su módulo de elasticidad no es constante, sino, que depende de la velocidad de aplicación de la carga y la temperatura de trabajo. Es por este motivo que es muy importante medir o determinar estos parámetros previos a la modelación. En la Figura 39 es posible observar una imagen térmica de la superficie del pavimento, esta temperatura superficial es utilizada para estimar la temperatura interna del pavimento.



**Figura 39.** Imagen térmica pavimento analizado

En este caso de estudio se utilizó un vehículo C2, para aplicar carga a la estructura, que posee un eje direccional delantero de 10,8 ton y un eje tándem trasero compuesto por un eje simple dual de 12,9 ton y otro de 12,4 ton. Para conocer el peso de cada eje se realizó un pesaje del vehículo utilizando balanzas del LanammeUCR debidamente calibradas (ver Figura 40).

Para la modelación se utilizó una frecuencia de carga equivalente a una velocidad de 6 km/h, ya que la prueba de carga se realizó a esta velocidad. Para realizar la prueba, se hizo pasar el vehículo patrón sobre la zona instrumentada. En la Figura 41 se puede observar una secuencia de fotografías que muestran el paso del camión sobre la zona instrumentada.

Con la velocidad y el espesor de carpeta asfáltica, se puede estimar la velocidad del pulso de carga y la frecuencia de carga, utilizando el diagrama de Barksdale. Para este caso se obtuvo que para una velocidad de 6km/h y a una profundidad media de 6,5 cm, el pulso de carga es de 0,26 segundos y la frecuencia de carga 3,7 Hz.



**Figura 40.** Pesaje y verificación de carga en el vehículo C2



**Figura 41.** Paso de vehículo con carga patrón en zona instrumentada



La rigidez de la mezcla asfáltica depende de la frecuencia y de la temperatura, por este motivo es necesario contar con un ensayo de laboratorio que brinde esta información. El ensayo de módulo dinámico (AASHTO-T342), permite realizar un barrido de frecuencias y temperaturas, lo cual permite estimar la curva maestra de la mezcla asfáltica mediante un proceso matemático y obtener el módulo de la mezcla a cualquier temperatura y frecuencia de interés.

Para facilitar el computo de la curva maestra a partir del ensayo de laboratorio el LanammeUCR, a través del PITRA, ha puesto al servicio de la comunidad ingenieril el software PITRA-ImoDin (interfaz de módulo dinámico). Este software permite, con unos simples pasos, realizar el proceso matemático de calcular los coeficientes del modelo sigmoidal de la curva maestra, utilizando varios métodos de ajustes. La interfaz de este software puede observarse en la Figura 42.

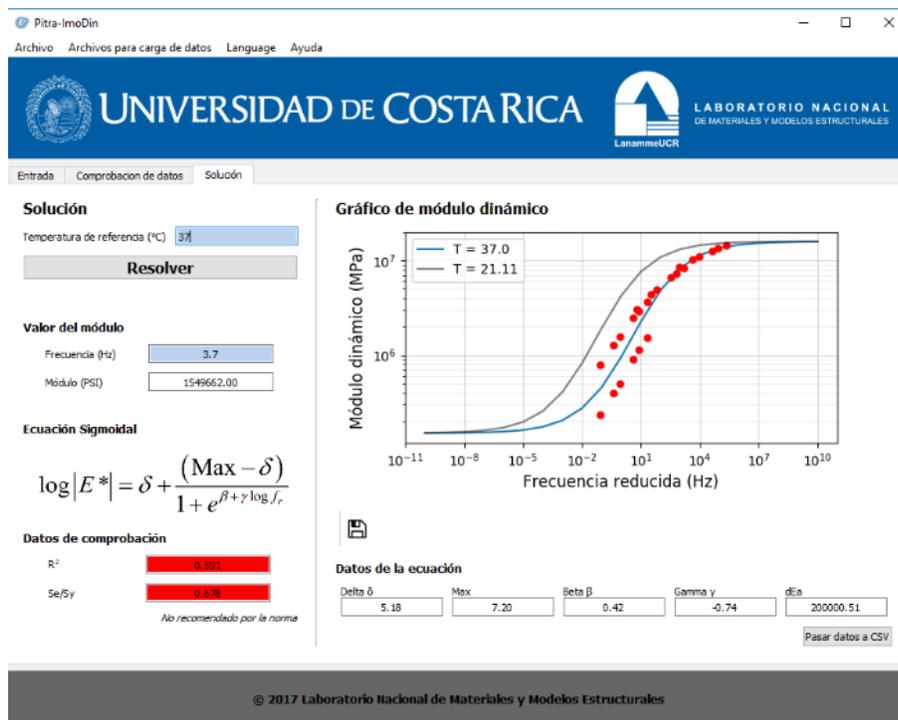


Figura 42. Salida software ImoDin-PITRA para mezcla analizada

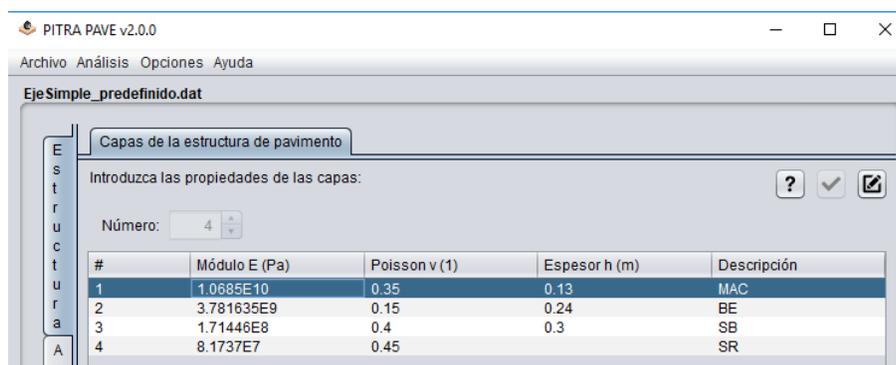
Para los materiales granulares y suelos, se utilizaron los ensayos de caracterización típicos como granulometría y límites para conocer el tipo de material, Proctor y CBR para densidad, y resistencia a la compresión en el caso de la BE, el detalle de la caracterización puede ser consultada el informe LM-PI-UIIT-114-2020-R1. Con estos parámetros es posible estimar el módulo aproximado de estos materiales.

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 64 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------

Es importante mencionar que, en este caso (pavimento semirrígido) para la base estabilizada con cemento, se utilizó en la modelación el 50% del módulo inicial del material, ya que estudios en el LanammeUCR con el simulador de vehículos pesados (HVS) (Camacho et al, 2019), muestran que los materiales estabilizados con cemento pueden perder entre un 50% y 60% de su módulo inicial en las primeras repeticiones de carga.

Conociendo el tipo de estructura, espesores de los materiales y módulos de estos, es posible realizar una modelación utilizando algunos de los métodos mencionados previamente. De igual forma, el LanammeUCR ha programado un software de multicapa elástica (PITRA-Pave), que permite a los ingenieros de Costa Rica realizar modelaciones de estructuras de pavimento de una forma eficiente.

Este software posee tres módulos. En el primero, se ingresa la estructura de pavimentos por examinar, en el segundo la carga y los puntos de la estructura por analizar y en el tercero se muestran los resultados de las respuestas de la estructura en los puntos de interés del módulo dos. En la Figura 43 es posible observar parte de la interfaz del módulo 1 y los valores utilizados para realizar la presente modelación.



PITRA PAVE v2.0.0

Archivo Análisis Opciones Ayuda

EjeSimple\_predefinido.dat

Capas de la estructura de pavimento

Introduzca las propiedades de las capas:

Número: 4

#	Módulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor h (m)	Descripción
1	1.0685E10	0.35	0.13	MAC
2	3.781635E9	0.15	0.24	BE
3	1.71446E8	0.4	0.3	SB
4	8.1737E7	0.45		SR

**Figura 43.** Interfaz de usuario software PITRA-Pave, módulo estructura

Para obtener las respuestas del pavimento es necesario utilizar una carga. En ese caso, a manera de ejemplo, se muestra la opción para modelar un eje simple sencillo, acorde con el eje direccional del vehículo C2 utilizado en la prueba de carga. En dicha interfaz se requiere el peso del eje, presión y los puntos de análisis.



Figura 44. Modelación de un simple, en software de multicapa elástica

En la Figura 45, se puede observar una salida del software con los resultados obtenidos de la modelación realizada con las respuestas críticas de la estructura. En dicha imagen se extrae el valor de la tercera línea, el cual corresponde a la respuesta crítica a tensión en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, este valor es uno de los requeridos para estimar el daño a fatiga en este material.

En esta modelación se obtuvo un valor de  $23,8 \mu\epsilon$  a tensión, el cual es un valor bajo acorde al tipo de estructura analizada, y que será utilizado como valor a comparar en la captura de datos.

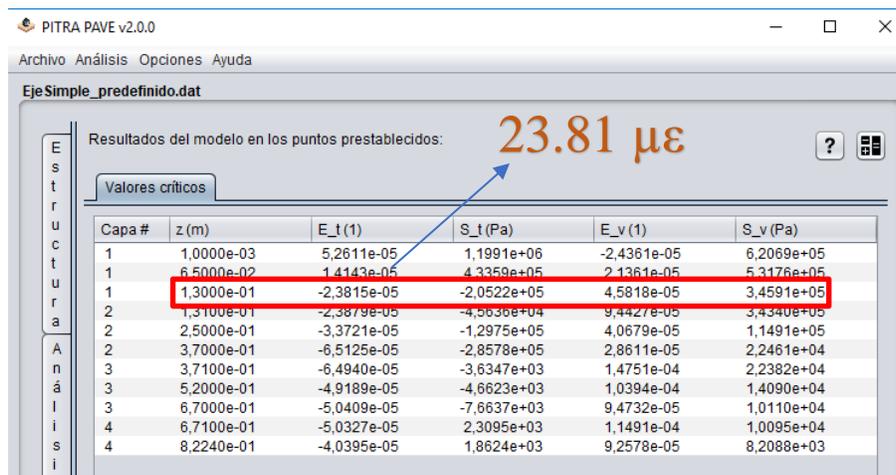


Figura 45. Salida del software PITRA-Pave

### 3.1.2 Medición de respuesta en campo

En este caso de estudio, se realizó una modelación de pavimento acorde con las prácticas propuestas para una guía de diseño de pavimentos mecánico empírica. Seguidamente, se realizaron mediciones en campo de la instrumentación colocada en los sitios de interés.

En el monitoreo de pavimentos en campo, puede destacarse 3 elementos fundamentales. El primero considera los sensores utilizados y la precisión de estos, como segundo componente, se puede mencionar el sistema de adquisición de datos, el cual debe cumplir con requisitos de cada proyecto para poder realizar la captura de información de los sensores instalados a la frecuencia de interés. Por último, el tercer elemento considera, el análisis de la información el cual incluye el filtrado de señales, separación de estas e interpretación.

En la Figura 46 se muestra la captura de una señal, asociada al sensor de deformación unitaria (galgas extensiométricas) en la fibra inferior de la MAC. En la misma, se pueden identificarse 3 pulsos asociados a los tres ejes del vehículo C2 (Tal y como lo muestra la Figura 46, lo señalado por un círculo corresponde a el eje delantero direccional).

En dicho gráfico puede observarse un valor cercano a los  $24 \mu\epsilon$  a tensión, el cual puede asociarse de forma directa con el valor modelado que se observa en la Figura 45, con  $23,8 \mu\epsilon$ . En este caso en particular y bajos los parámetros ingresados en la modelación, se puede inferir que la modelación realizada es muy cercana a los valores que se presentan en la estructura real.

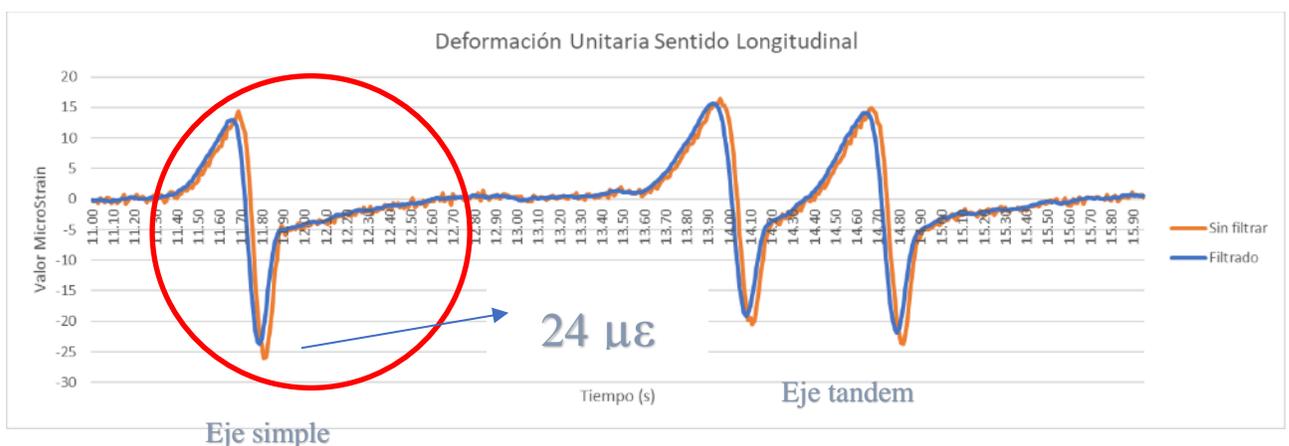


Figura 46. Captura de datos vehículo C3

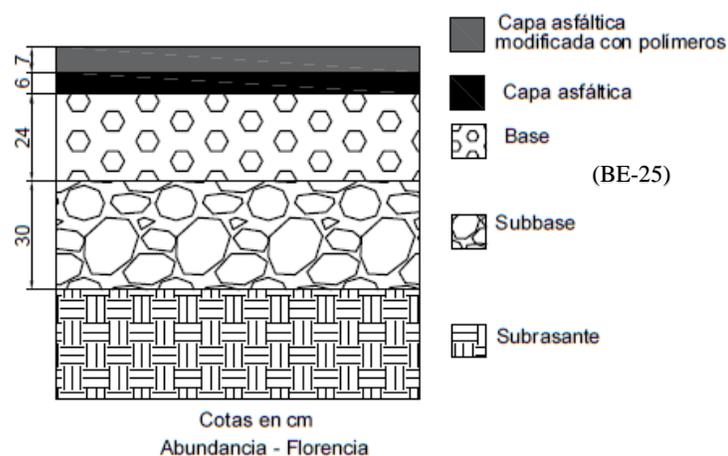
### 3.2 Mediciones periódicas sobre rutas nacionales

#### 3.2.1 Ruta Nacional N° 35, Abundancia -Florencia (Tramo DPLP-CR # 26)

Como se mencionó en líneas previas uno de los objetivos es registrar datos de respuestas, para analizar el comportamiento general de estas, antes cargas reales de tránsito para diferentes vehículos. Así que la instrumentación comentada en la sección 3.1 del presente informe, ha sido utilizada para registrar valores de vehículos en condiciones reales. Los resultados de las aplicaciones de carga dependen del tipo de vehículo y la carga por eje de cada uno de estos.

La estructura del pavimento instrumentado se muestra en la Figura 47, en ese caso corresponde a una estructura de pavimento semirrígido. El estudio de los efectos de las cargas sobre las capas instrumentadas (subbase y subrasante) fue realizado para vehículos de carga liviana (pick-ups), tipo camión C2+, C2, y T3-S2.

Las cargas máximas permitidas por el Reglamento de Circulación por Carretera con Base en el Peso y las Dimensiones de los Vehículos de Carga, Decreto N° 31363 (MOPT, 2003) se muestran en el Anexo C del documento, de este se puede determinar un rango de cargas que son aplicadas sobre el pavimento para el análisis de esfuerzos en las distintas capas de la estructura, con lo cual pueden comprarse las magnitudes de los valores registrados.



**Figura 47.** Estructura de pavimento del tramo Abundancia – Florencia

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 68 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



### 3.2.1.1 Carga Liviana

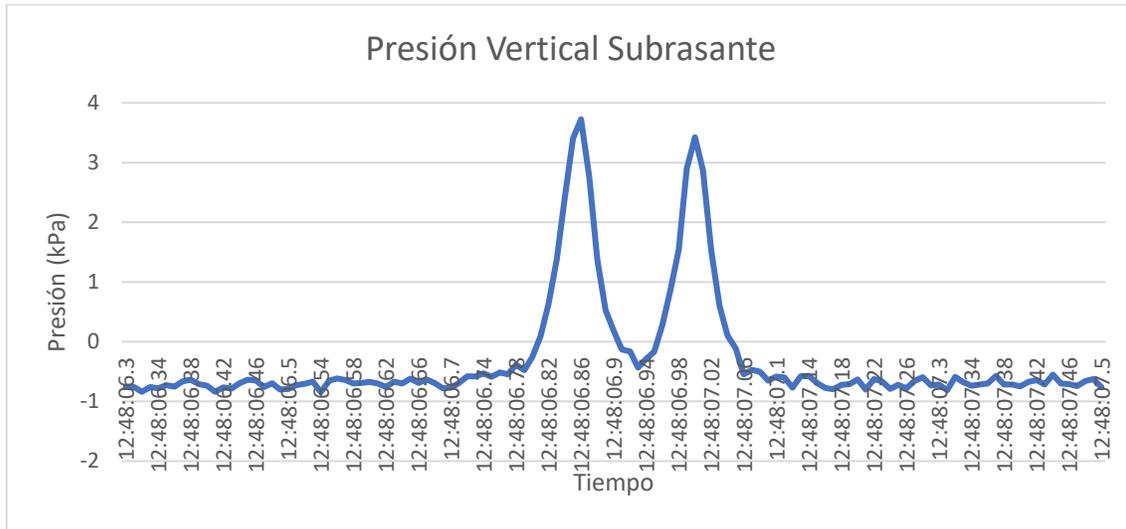
En la Figura 49 se muestran los esfuerzos registrados por el paso de un vehículo de carga liviana (pick up) con dos ejes simples, en la Figura 49 y Figura 50 se muestran ejemplos de datos capturados. Se puede observar un esfuerzo cercano a los 4 kPa sobre la parte superior de la subrasante.

Debido a la disipación de esfuerzos a lo largo de la estructura del pavimento, estos deben ser menores en subrasante respecto a los valores medidos en la subbase. Los esfuerzos en la subbase muestran el mismo comportamiento de los registrados en la subrasante, donde el primer eje de carga aplicado sobre la estructura tenía una carga mayor en comparación con el segundo (vehículo descargado).

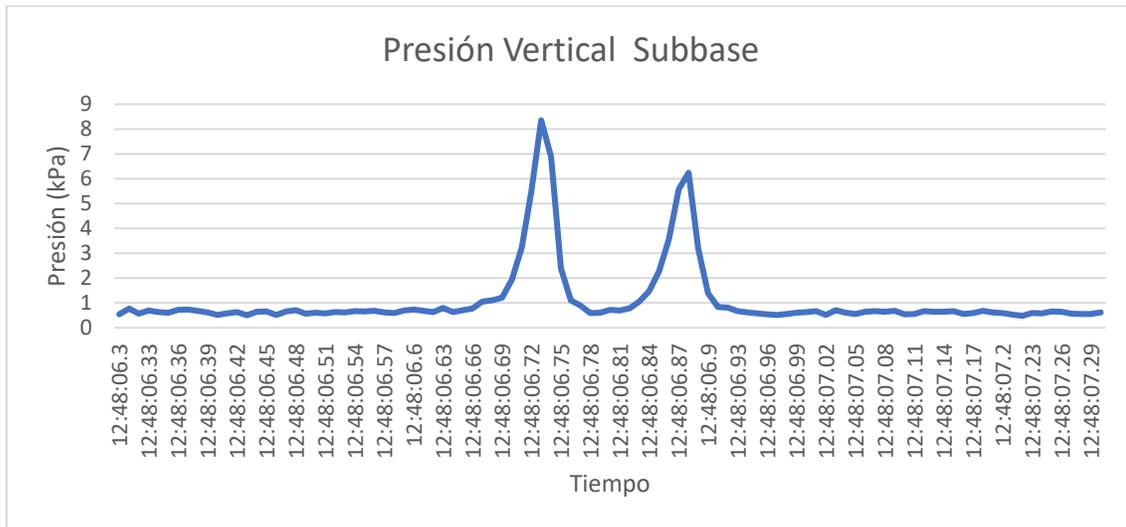
Respecto a la proporcionalidad de los valores, se consideran como datos esperados ya que modelaciones en ejes simples inferiores 5 toneladas, se encuentran por debajo de los 10 kPa a nivel de subbase.



**Figura 48.** Vehículo de carga liviana en el tramo Abundancia – Florencia



**Figura 49.** Presión en la subrasante con vehículo de carga liviana tramo Abundancia – Florencia



**Figura 50.** Presión en la subbase con vehículo de carga liviana tramo Abundancia – Florencia

### 3.2.1.2 Vehículos tipo Camión C2+

Los datos presentados en la Figura 52 reflejan los esfuerzos captados en la subrasante a partir de la carga de un camión tipo C2+, como el de la Figura 51. Estos esfuerzos son mayores en comparación con los



registrados por el vehículo de carga liviana (pick up) de la subsección anterior, debido a un mayor peso por eje, este vehículo de forma reglamentaria no debería superar las 6 toneladas de peso total.

En contraparte con lo mostrado a partir del comportamiento de los esfuerzos generados por la carga del pick up, el registro de este vehículo muestra una mayor carga en el eje trasero, lo cual es congruente con vehículos de carga. En la Figura 53 se muestra la presión medida por los sensores, para este caso de carga se registró una presión máxima de aproximadamente 7 kPa en la fibra superior de la subrasante y de 16 kPa en la fibra superior de la subbase.



**Figura 51.** Camión tipo C2 en la ruta Abundancia – Florencia

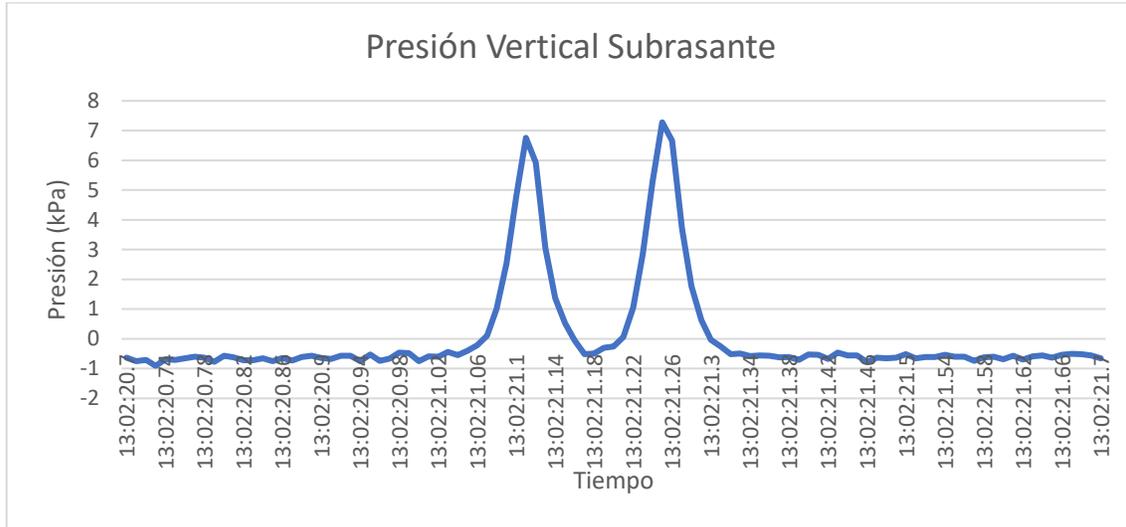


Figura 52. Presión en la subrasante con camión C2 tramo Abundancia – Florencia

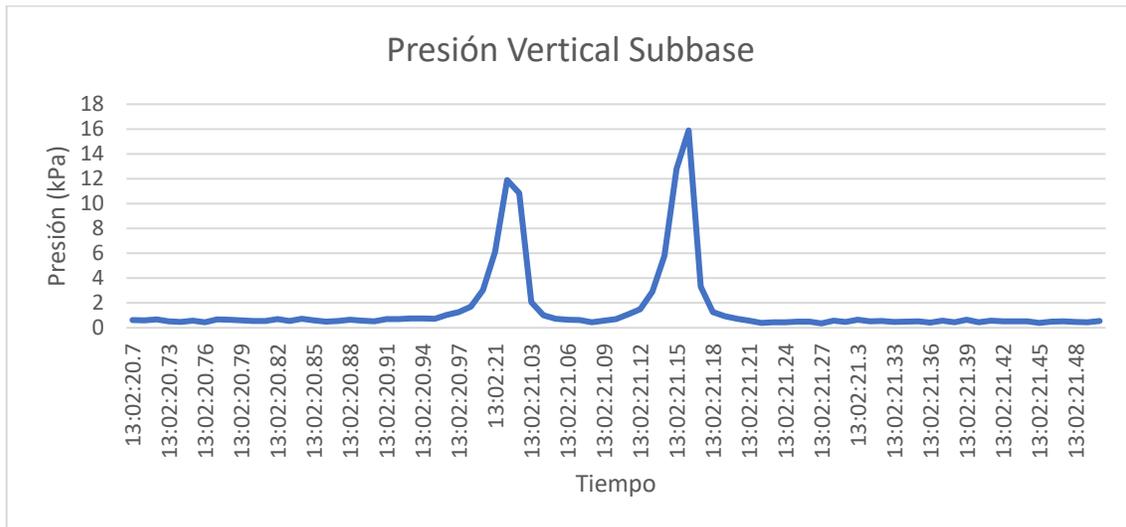


Figura 53. Presión en la subbase camión C2 tramo Abundancia – Florencia



### 3.2.1.3 Vehículos tipo Camión C2

Similar al caso presentado en la subsección anterior, el eje posterior del camión posee mucho mayor carga, esto se refleja en las presiones registradas en la Figura 55 y la Figura 56, donde se muestra una presión máxima registrada en la subrasante y la subbase de aproximadamente 18kPa y 36 kPa respectivamente. Este vehículo debería tener una carga máxima de 16 toneladas (10 ton en el eje trasero) y las modelaciones brindan valores entre 20kPa y 30 kPa, para ejes entre 6 y 10 ton.



**Figura 54.** Camión tipo C2 en el tramo Abundancia – Florencia

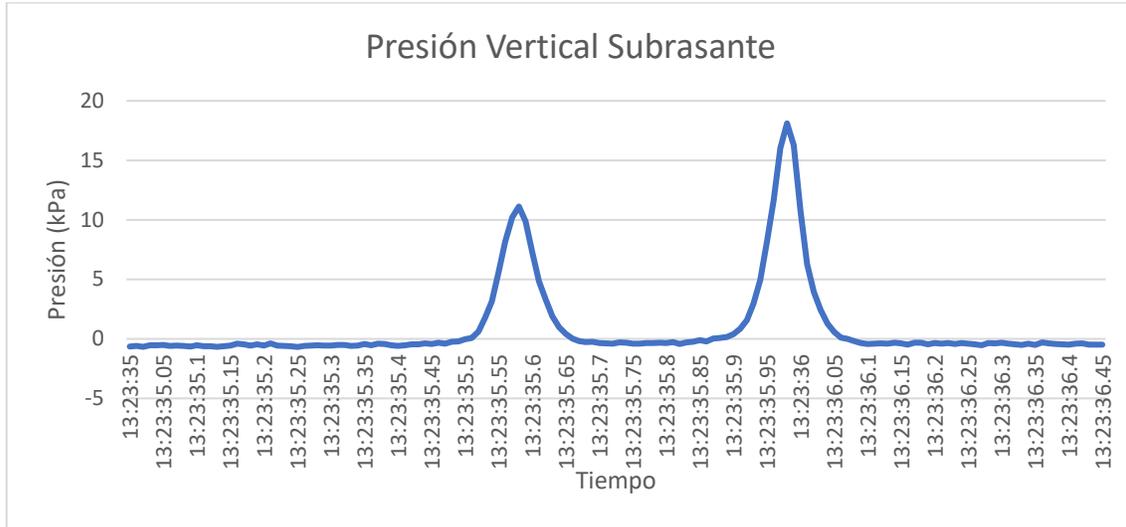


Figura 55. Presión en la subrasante camión C2 tramo Abundancia – Florencia

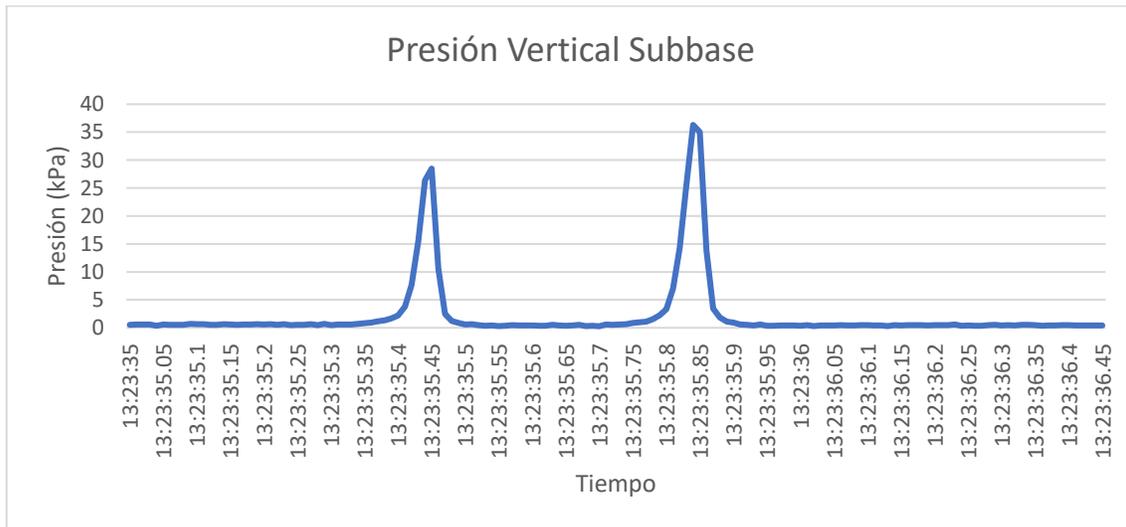


Figura 56. Presión en la subbase camión C2 tramo Abundancia – Florencia



### 3.2.1.4 Vehículos tipo T3-S2

El camión tipo T3-S2 (ver Figura 57) presenta una aplicación de carga con un patrón distinto a los casos anteriores, esto se debe a la cantidad de ejes que posee el vehículo. En la Figura 58 y la Figura 59 se muestra que la distribución de cargas en el primer eje, que cabe resaltar se trata de un eje sencillo, es el menor de los registros, posteriormente se mide la presión generada por la aplicación del segundo eje del vehículo, el cual según la Figura 57 es un eje tándem por lo que se muestra una presión doble sobre el sensor. Finalmente se muestra la aplicación de carga del tercer eje sobre el sensor de presión, en este caso también se trata de un eje tándem.

Para el vehículo T3-S2, se obtuvo una presión máxima de 35 kPa en la subrasante y de aproximadamente 71 kPa en la subbase, en ambos casos el eje que aplicó mayor presión fue el tercero por lo que se infiere que una mayor parte del peso del vehículo y su carga transportada se aplicó sobre el tercer eje.



**Figura 57.** Vehículo T3-S2 en la ruta Abundancia – Florencia

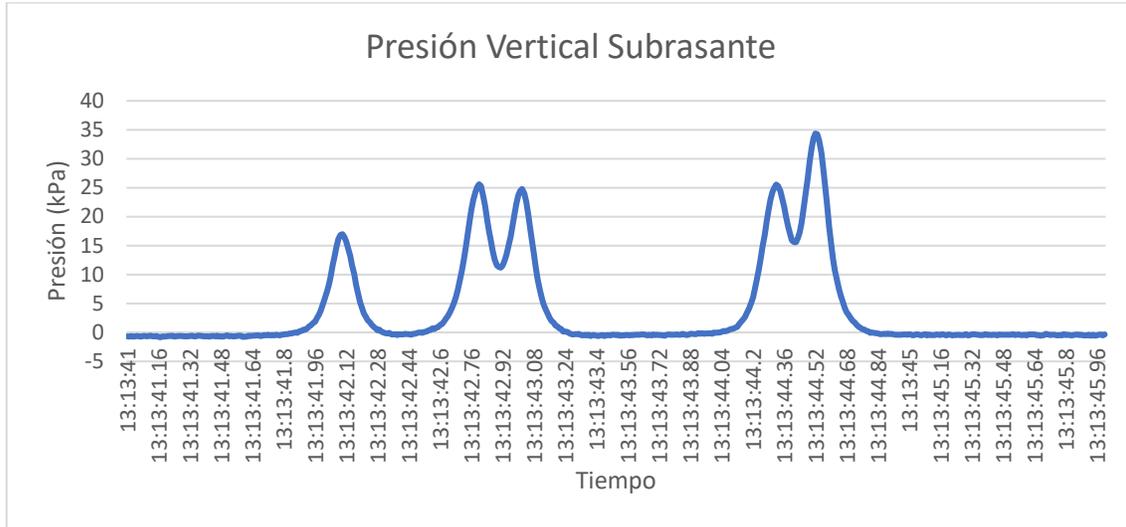


Figura 58. Presión en la subrasante vehículo T3-S2 tramo Abundancia – Florencia

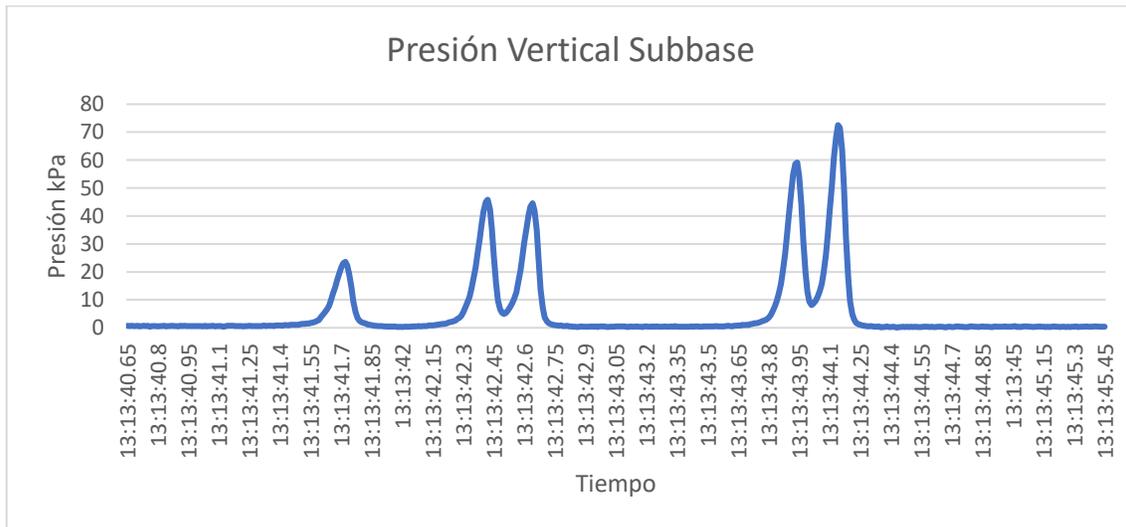
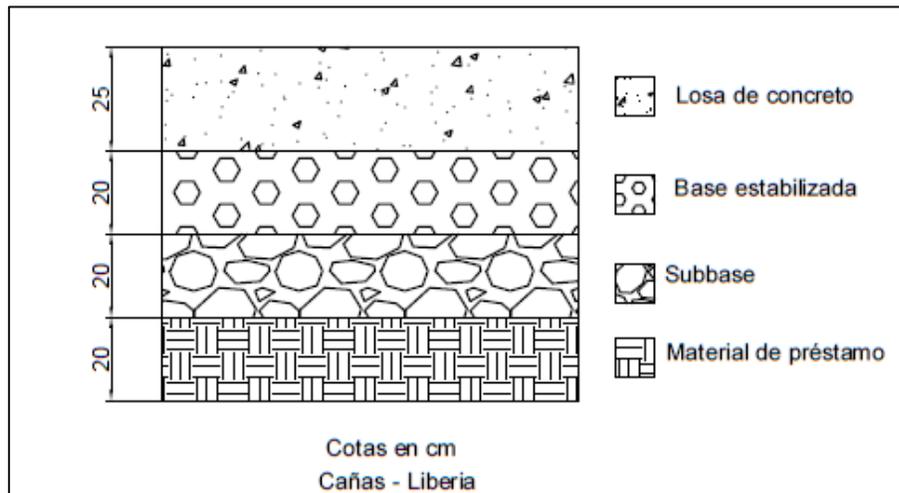


Figura 59. Presión en la subbase vehículo T3-S2 tramo Abundancia – Florencia

### 3.2.2 Ruta Nacional N°1, Cañas-Liberia (Tramo DPLP-CR # 20)

En el año 2019, se realizaron mediciones en la sección comprendida entre las comunidades de Cañas y Liberia de la provincia de Guanacaste. Este es un pavimento rígido y este tipo de estructuras tienen la particularidad de disipar los esfuerzos de cargas externas en una mayor área (conjunto de losas), en donde los resultados obtenidos indican que los esfuerzos en un pavimento rígido pueden ser de entre 15 a 30 veces inferiores respecto a un pavimento semirrígido a nivel de subrasante.

La estructura de pavimento de esta ruta se muestra en la Figura 60, dicha estructura se encuentra compuesta por una losa de concreto de 25 cm de espesor, una base estabilizada con cemento (BE-35) de 20 cm de espesor, una capa de subbase de 20 cm y esto sobre un material de préstamo con un CBR >5%.



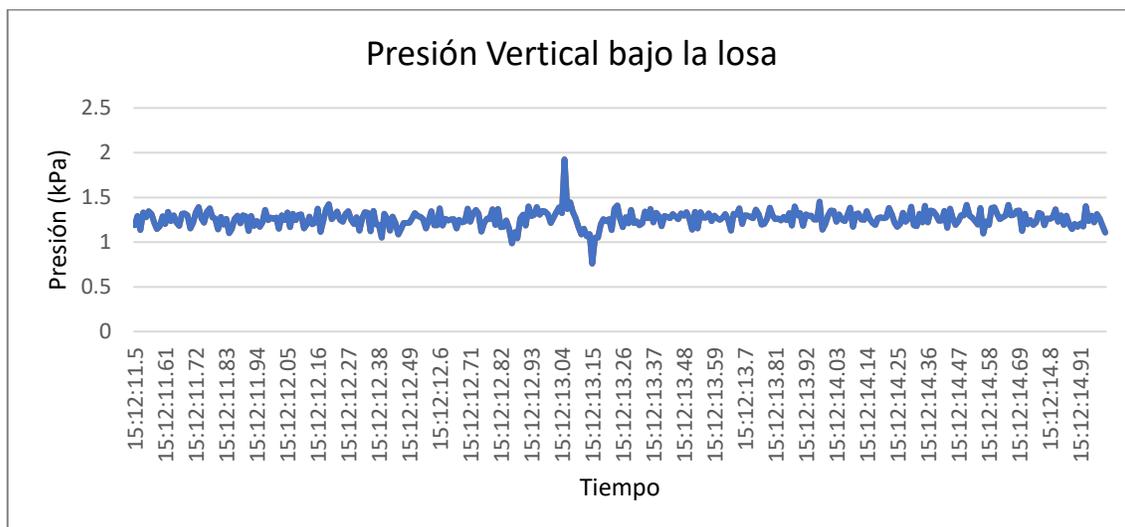
**Figura 60.** Estructura de pavimento de la ruta Cañas Liberia

En las siguientes figuras se muestran resultados obtenidos para vehículos tipo C2, C2 Bus, C3, T3- S2 y T3-S3. Es de apreciar que para los vehículos analizados y en este pavimento en particular los valores oscilan entre los 0,5 kPa y 1,5 kPa, siendo estos valores muy bajos. Adicionalmente, en este pavimento están siendo analizados otras variables más críticas como el alabeo por temperatura, cuyos resultados serán presentados a futuro, conforme se reúna más información.

### 3.2.2.1 Vehículo (Autobús)



**Figura 61.** Autobús en el tramo Cañas – Liberia



**Figura 62.** Tiempo vs. Presión para un autobús tramo Cañas – Liberia

3.2.2.2 Vehículos (C3)



Figura 63. Vehículo C3 en la ruta Cañas – Liberia

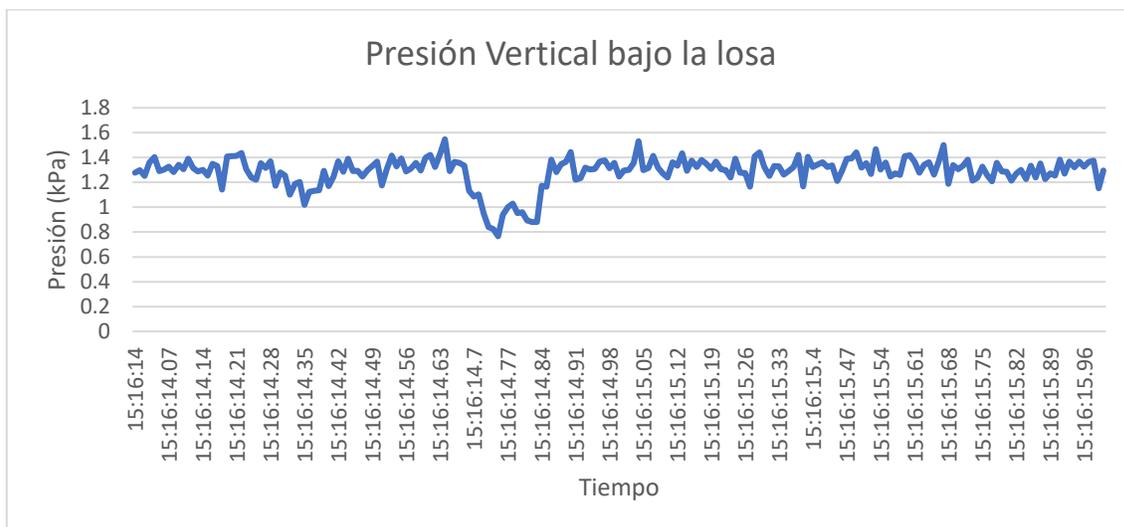


Figura 64. Tiempo vs. Presión vehículo C3 tramo Cañas – Liberia

### 3.2.2.3 Vehículos T3-S2



**Figura 65.** Vehículo T3-S2 en el tramo Cañas – Liberia (a)



**Figura 66.** Vehículo T3-S2 en el tramo Cañas – Liberia (b)

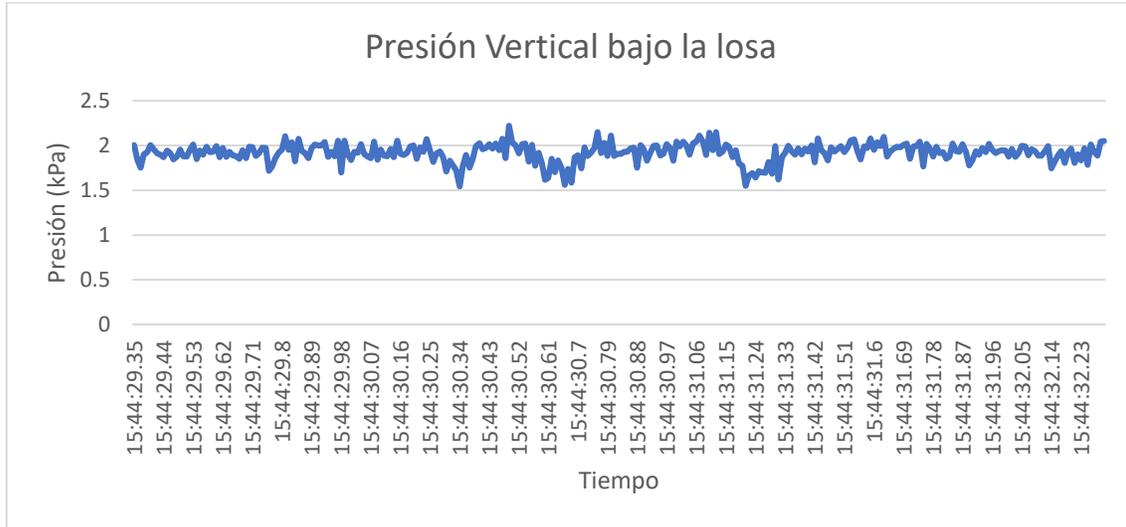


Figura 67. Tiempo vs. Presión vehículo T3-S2 tramo Cañas – Liberia

3.2.2.4 Vehículos T3-S3



Figura 68. Vehículo T3-S2 (a) tramo Cañas – Liberia



Figura 69. Vehículo T3-S2 (b) tramo Cañas – Liberia

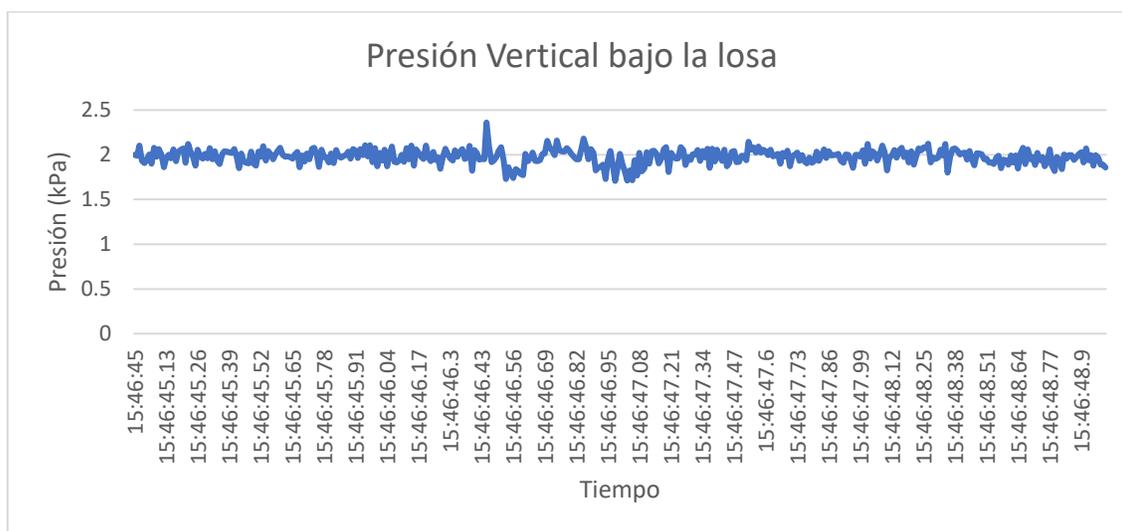
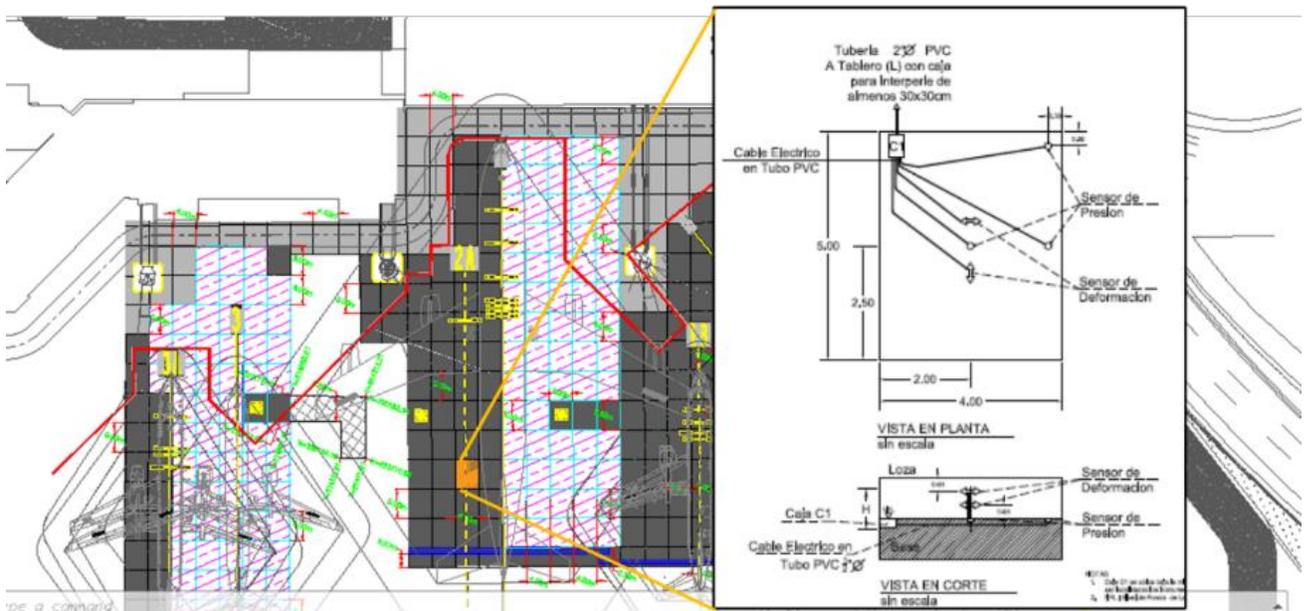


Figura 70. Tiempo vs. Presión en vehículo T3-S2 tramo Cañas – Liberia

### 3.3 Proyectos especiales

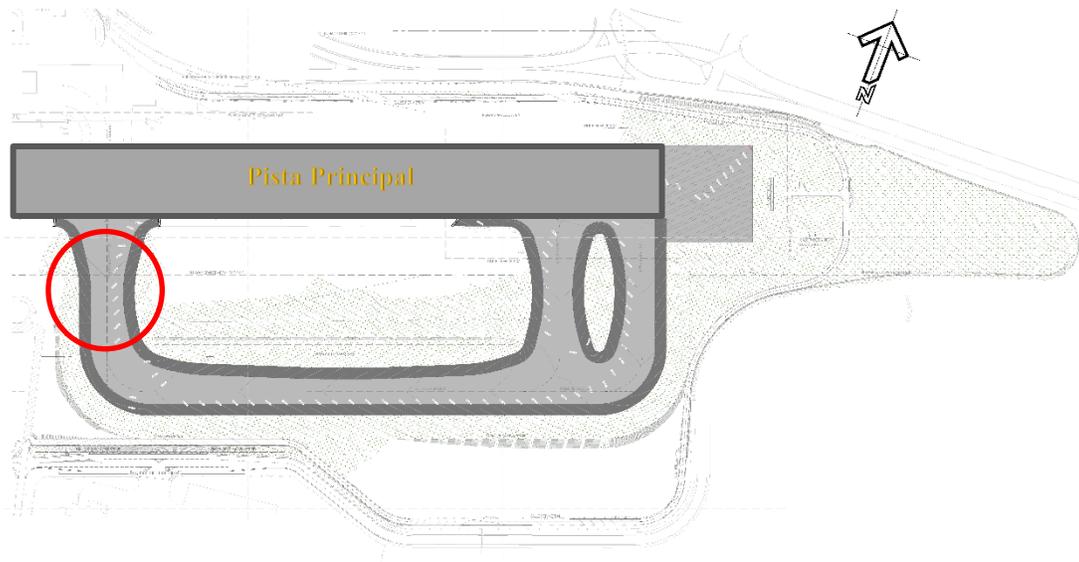
Como parte de los estudios adicionales con el objetivo de comprender de una mejor forma el comportamiento de los pavimentos sometidos a cargas de gran magnitud, se han instrumentado dos secciones de pavimento del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, AIJS, una sobre el pavimento rígido de la puerta tres, que recibe aviones de categoría E, como el Airbus A340 o el Boing 777, con pesos que oscilan entre las 350 toneladas y 230 toneladas. La otra sección se encuentra en el llamado conector Bravo Sur, por donde circula gran variedad de aeronaves y está compuesto por un pavimento flexible.

En la Figura 71 puede observarse la ubicación de la losa instrumentada en la puerta 3 del AIJS, donde se ubica la sala de abordaje de aviones categoría E y D del aeropuerto, con aviones como el A340-600, A330-200.



**Figura 71.** Ubicación de la losa instrumentada, puerta 3 AIJS

En la Figura 72 se puede observar un esquema con la ubicación de la instrumentación instalada en el conector Bravo Sur, a un costado de la pista principal.



**Figura 72.** Ubicación de instrumentación en el conector Bravo Sur AIJS

Fuente: (ISR, 2017)

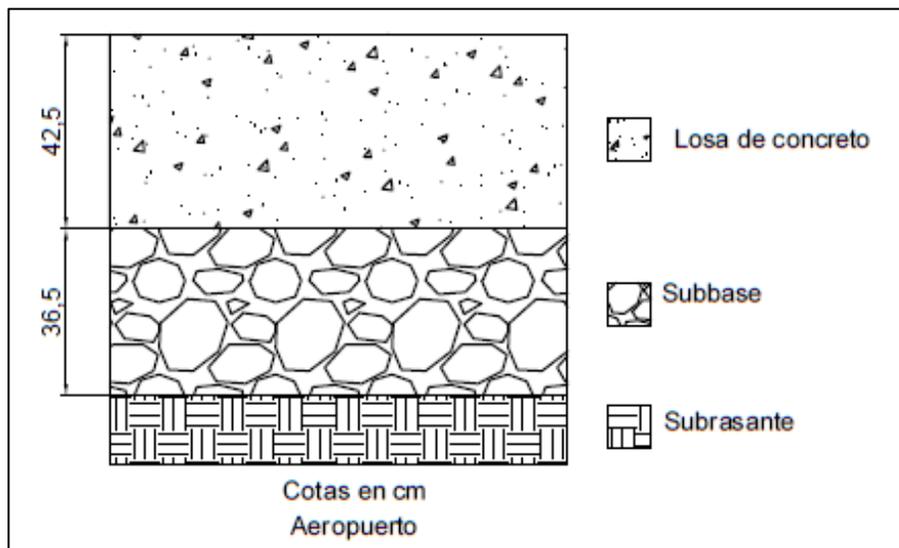
### 3.3.1 Mediciones en puerta tres AIJS, pavimento rígido

Este pavimento rígido es una estructura muy masiva, preparada para soportar las cargas extremas de aviones tipo E y D. En la Figura 73 se puede observar las dimensiones de este pavimento, el cual se encuentra compuesto por una losa de concreto de 42 cm de espesor, una base estabilizada con cemento de 36 cm y la subrasante del proyecto. Además, en la Figura 74, se muestra una fotografía con la ubicación de los sensores dentro de la losa, que han sido comentados en secciones previas.

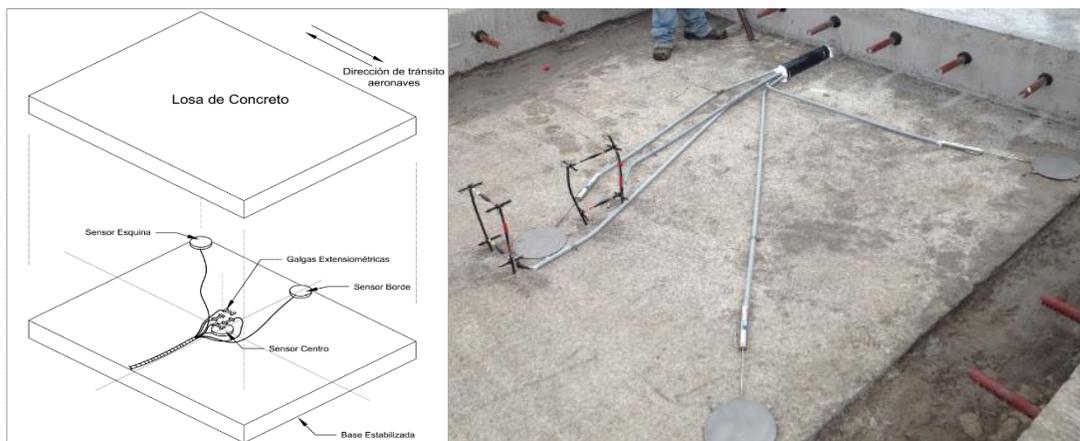
Es importante aclarar, que sólo se instrumentó una losa, debido a esto y a que las losas son componentes discretos, sumado a que una vez que esta sección entró en operación hubo un cambio leve de demarcación, se dio la situación de que con estos cambios las aeronaves ya no iban a pasar por el centro de la losa, sino por su borde.

Esto provocó que el esquema de análisis se ampliara, pues con la nueva configuración se iban a tener: -cargas de borde completa: el juego de llantas pasa por el borde la losa, cargas de borde parciales: parte del eje pasa por la losa instrumentada y la losa adyacente y, casos donde el eje no pasa por la losa, por este motivo las mediciones también se han analizado de esta forma, con ayuda de fotografías.

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 84 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



**Figura 73.** Estructura de pavimento en la puerta tres, AIJS



**Figura 74.** Ubicación de instrumentación instalada en la puerta tres, AIJS

En las siguientes secciones se muestran casos puntuales de medición, así como datos resumen de respuestas.

### 3.3.1.1 Tránsito de la Aeronave sobre el centro de la losa (Airbus A340-600), 01 octubre del 2019

En este caso en particular se muestra el paso de un A340-600, donde uno de sus ejes traseros pasa por el centro de la losa, como se observa en la Figura 75 y Figura 76. Al ser las losas elementos discretos, puede

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 85 de 140
--------------------------------	--------------------------------	------------------



darse la situación de que el eje trasero no pase del todo por la losa: carga parcial en borde o total en el borde, como se comentó previamente.

Por ese motivo, se coordinó con el gestor del aeropuerto para lograr una carga completa por el centro de la losa, lo cual fue de mucha utilidad para complementar las mediciones con el resto de los registros. Sin embargo, por cómo se encuentra ubicada la losa respecto de la aeronave, lo común es obtener cargas parciales (medio eje) o totales en el borde de la losa, donde el valor de esfuerzo máximo se alcanza en la esquina de la losa.



**Figura 75.** Paso eje trasero Aeronave Airbus A340-600 (a)



*Figura 76.* Aeronave Airbus A340-600 (b)

Como se puede observar en las siguientes figuras, el mayor registro para este tipo de carga (centro de la losa) se obtuvo del sensor ubicado en el centro de la losa, con la aeronave a carga máxima (salida-despegue) donde alcanzó la magnitud de 0,7 kPa (ver Figura 81). Para los registros de deformación unitaria, los valores fueron cercanos a los 12  $\mu$ s a compresión y 15  $\mu$ s a tensión (ver Figura 80 y Figura 81).

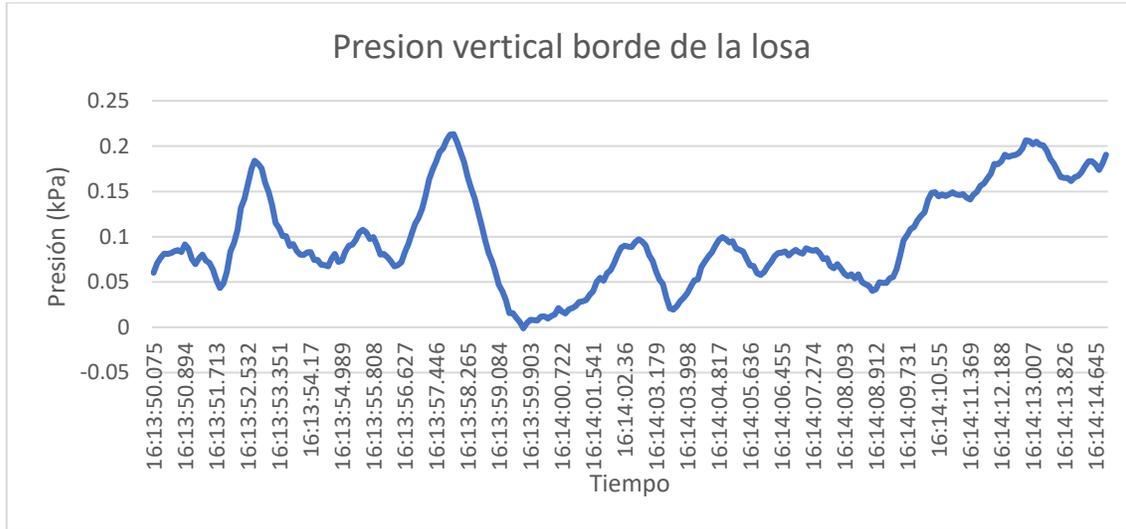


Figura 77. Tiempo vs. Presión vertical en el borde de la losa

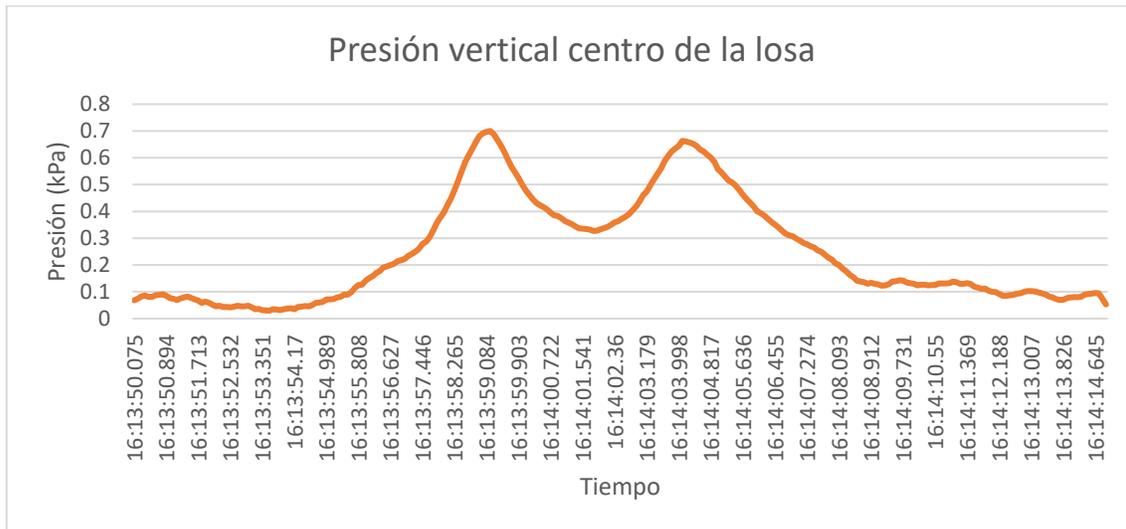


Figura 78. Tiempo vs. Presión vertical en el centro de la losa

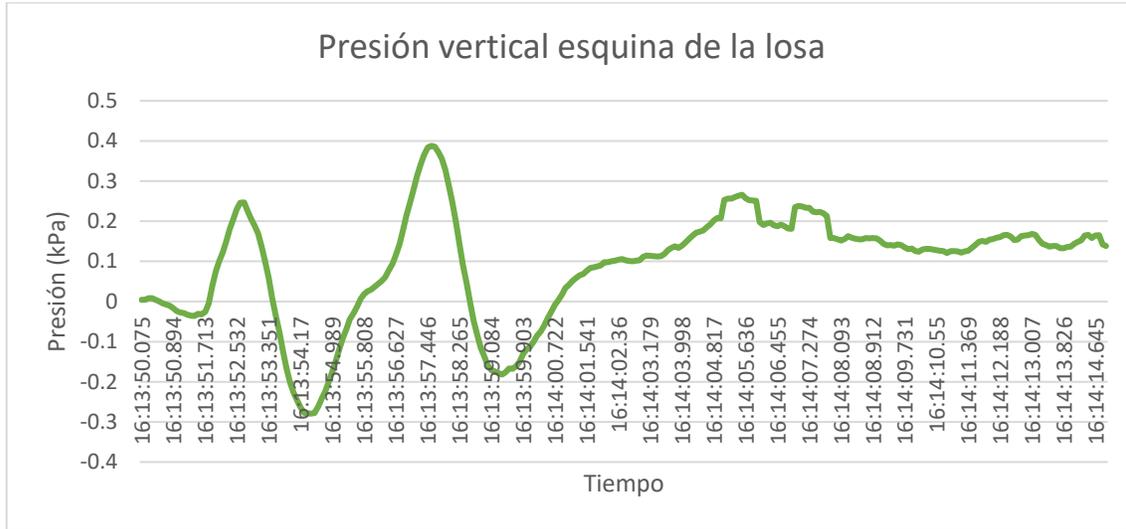


Figura 79. Tiempo vs. Presión vertical en la esquina de la losa



Figura 80. Deformación unitaria fibra superior de la losa

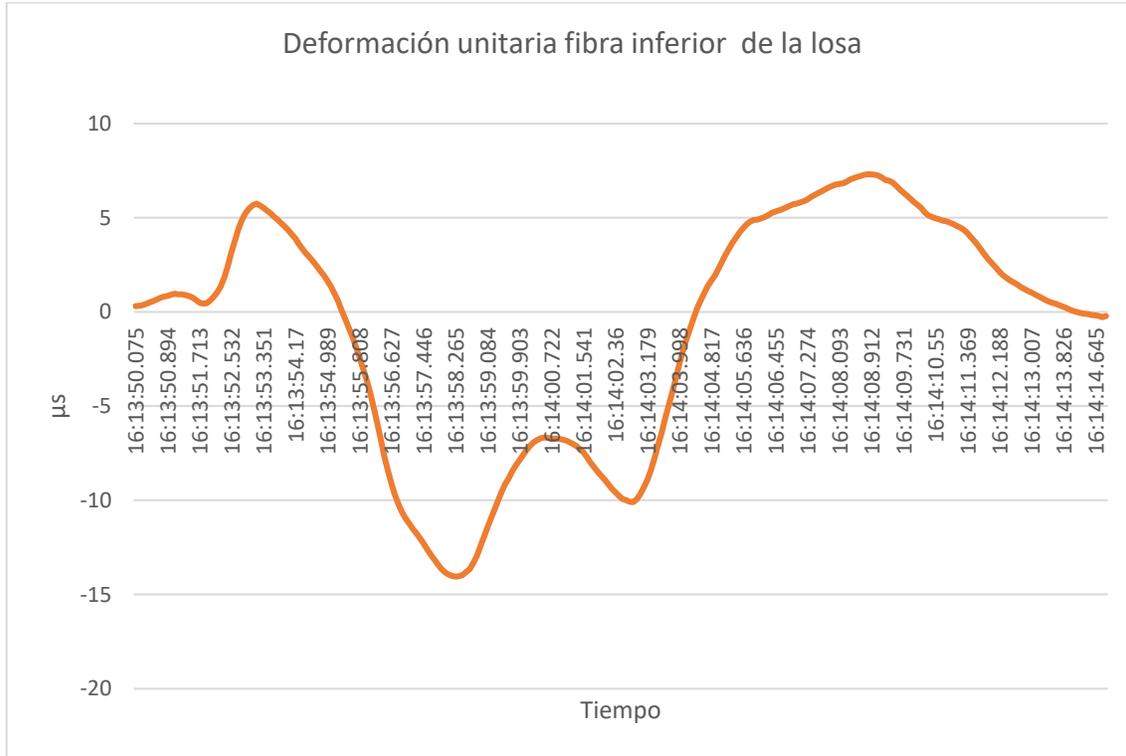


Figura 81. Deformación unitaria en la fibra inferior de la losa

### 3.3.1.2 Tránsito de la Aeronave sobre el borde la losa (Airbus A340-600), 02 octubre del 2019

La Figura 82 muestra un patrón típico de carga (condiciones normales de operación), donde solo la mitad del eje transita por el borde la losa instrumentada. Para este tipo de carga, se registró un valor de 0,7 kPa (ver Figura 83) en el sensor de presión ubicado en la esquina de la losa, se debe considerar que este valor es cuando la aeronave se encuentra arribando por lo tanto viene con mucho menos carga de combustible y la carga sobre la losa es parcial. Los valores de deformación unitaria son cercanos a los  $6\mu s$  a tensión (ver Figura 86 y Figura 87).



**Figura 82.** Vehículo Airbus A340-600

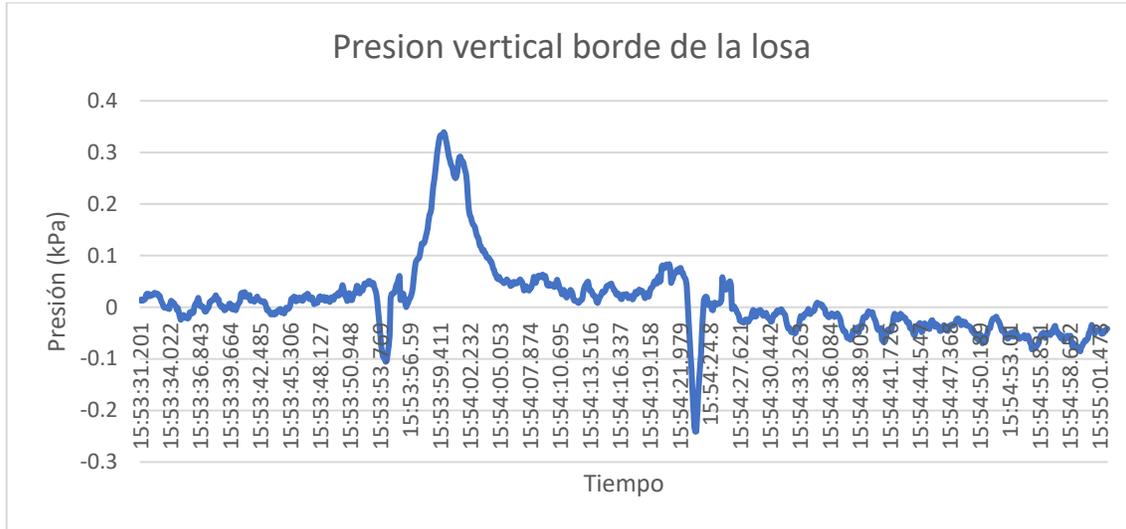


Figura 83. Tiempo vs. Presión en el borde 02/10/2019

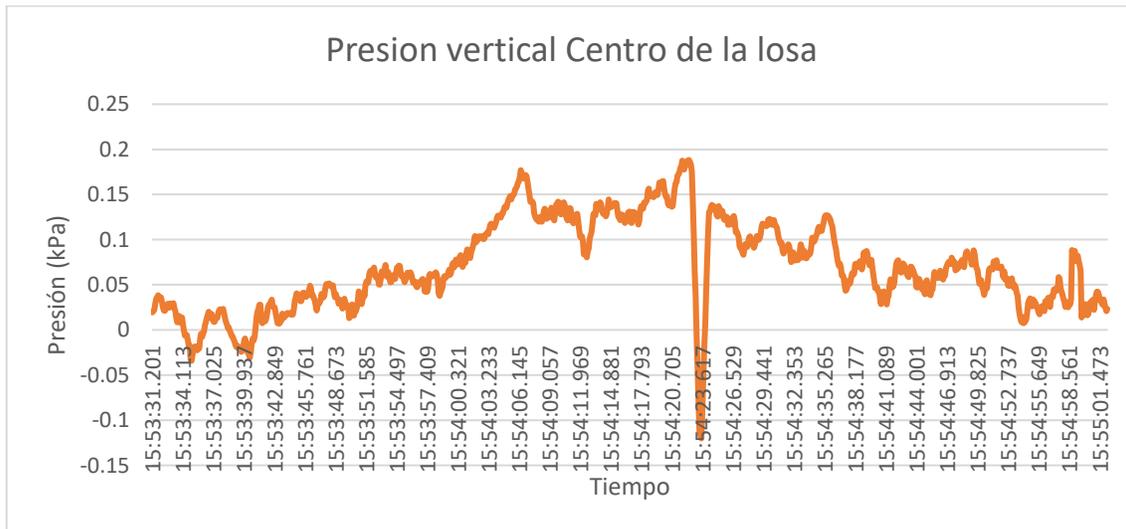


Figura 84. Tiempo vs. Presión en el centro 02/10/2019

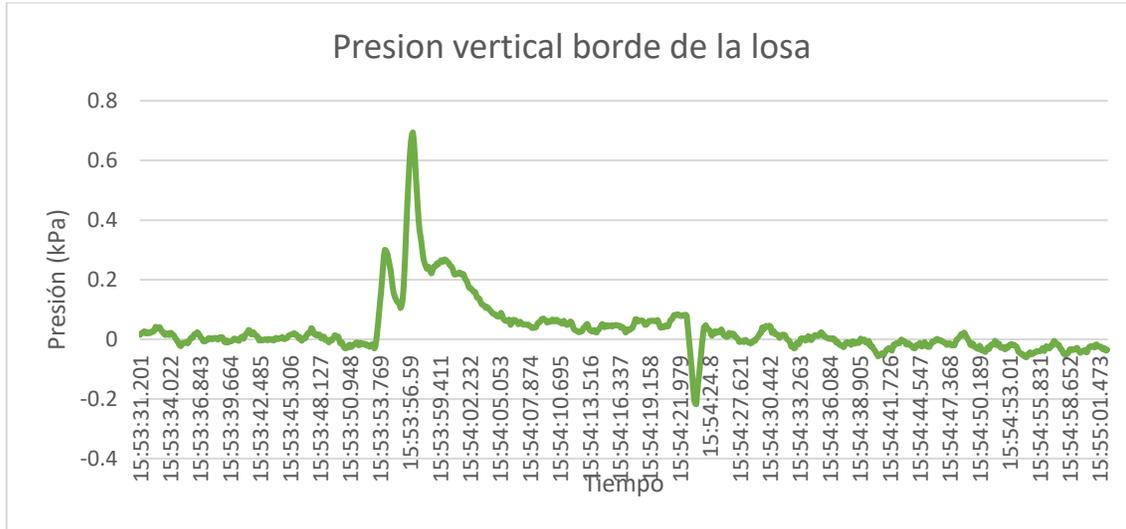


Figura 85. Tiempo vs. Presión en la esquina 02/10/2019

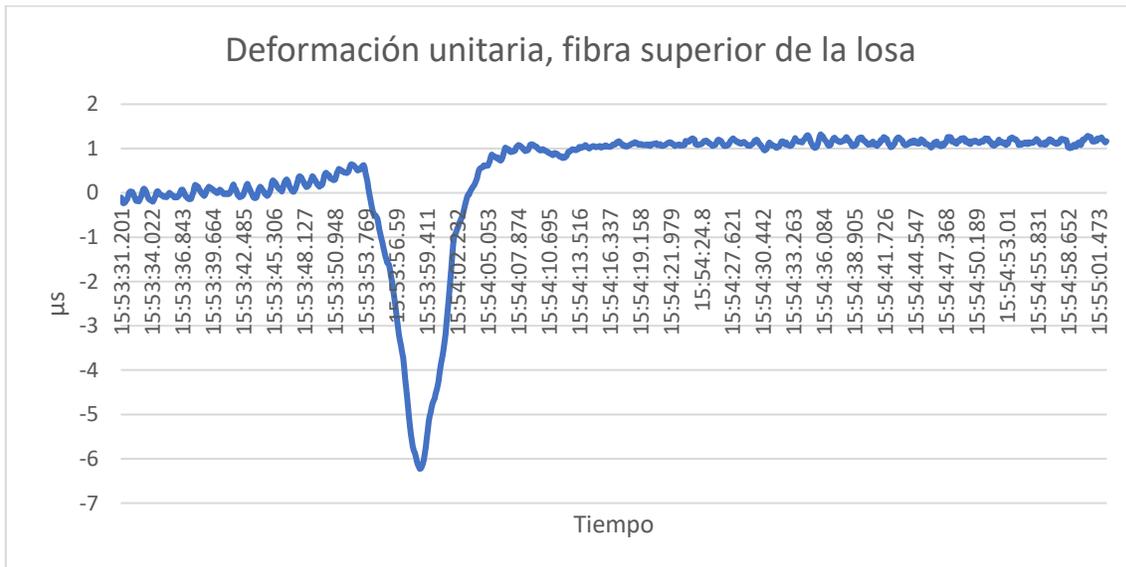
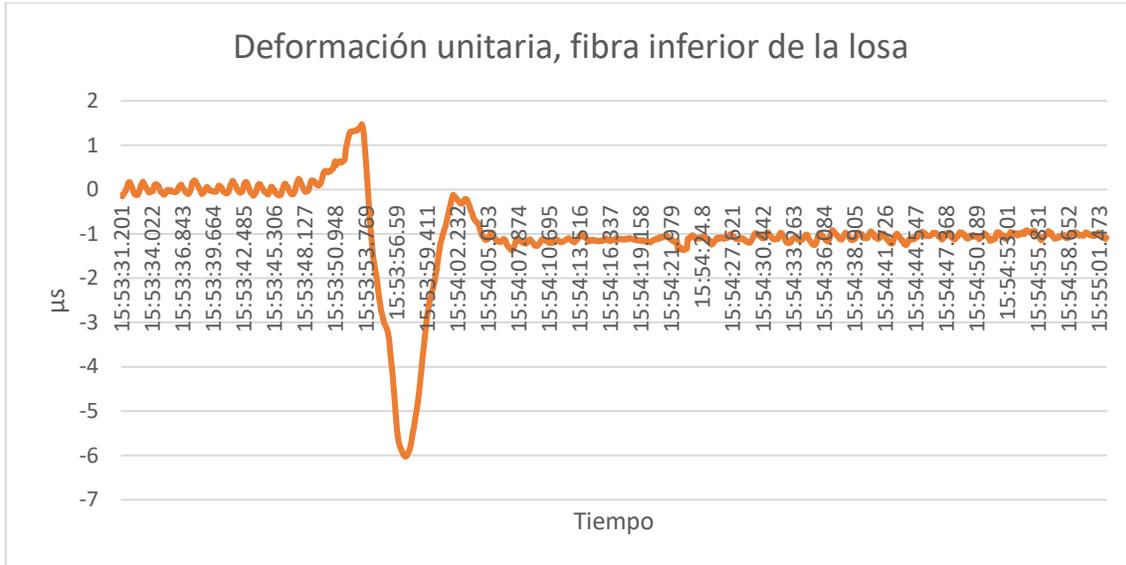
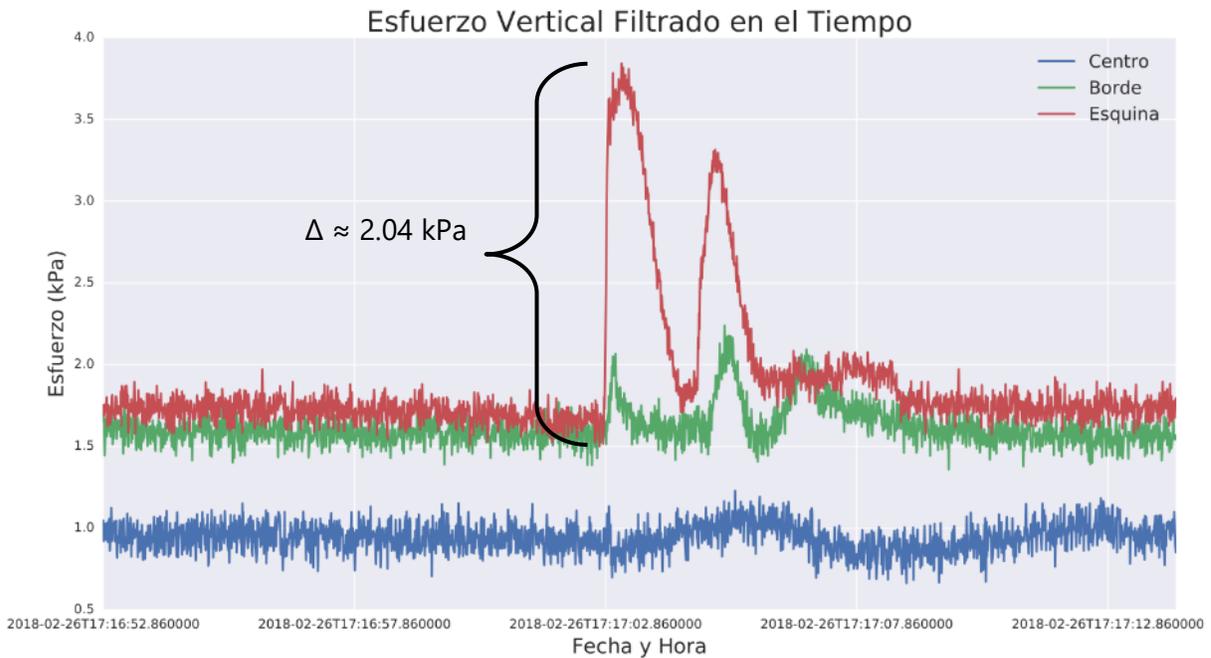


Figura 86. Deformación en la galga superior 02/10/2019

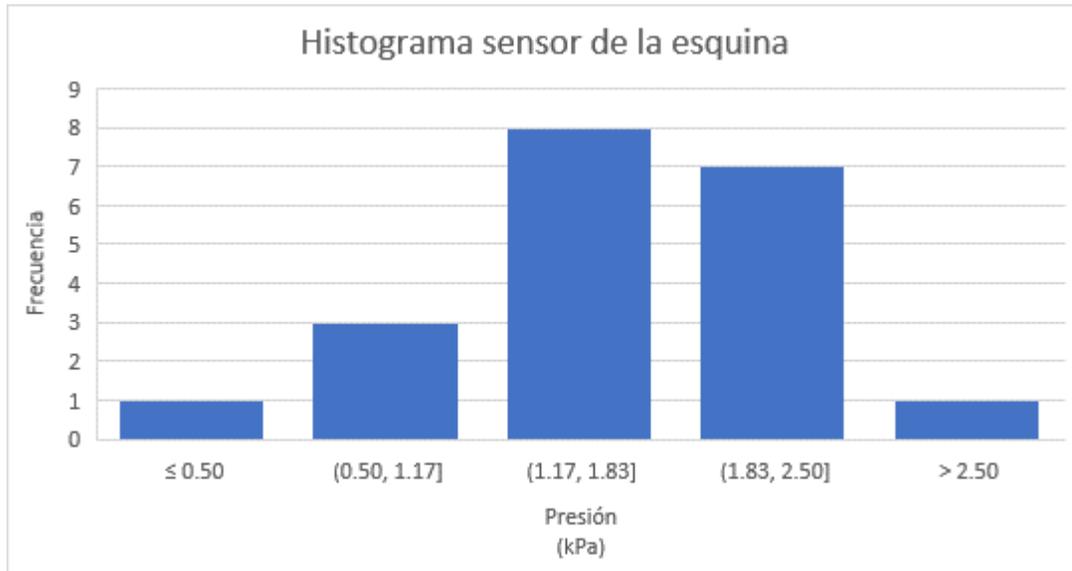


**Figura 87.** Deformación en la galga inferior 02/10/2019

En el caso de carga completa en el borde pueden obtenerse valores de hasta 2 kPa o superiores como se muestra en un registro del 2018 (ver Figura 88). En la Figura 89 se muestra un histograma de respuestas obtenidas para el sensor de la esquina (resumen), donde se observa que la mayor cantidad de registros se dan entre 1kPa y 2,5 kPa, para una aeronave A340-600 en condición de arribo.



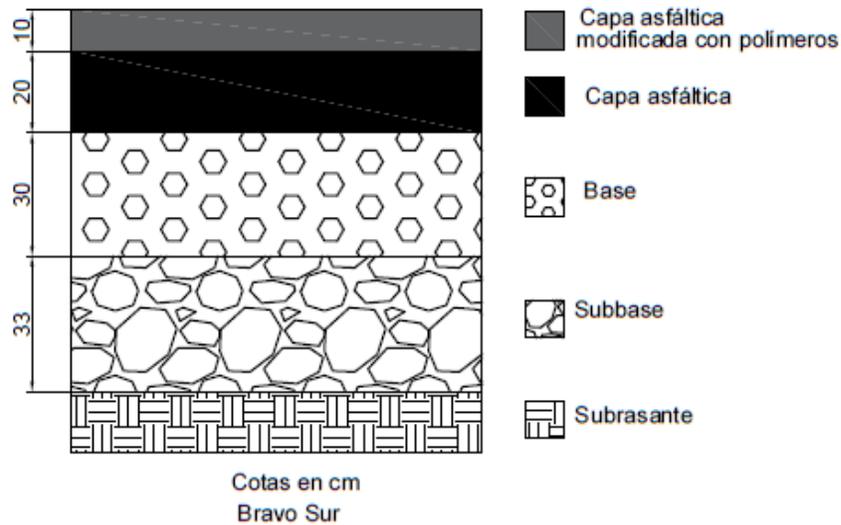
**Figura 88.** Ejemplo carga completa sobre el borde



**Figura 89.** Resumen de registros para el sensor presión de la esquina de la losa, resumen de datos del 2018-2019

### 3.3.2 Mediciones en el conector Bravo-Sur AIJS, pavimento flexible

La estructura de pavimento flexible colocada en el conector Bravo Sur, corresponde a un pavimento flexible, compuesto de dos capas de mezclas asfáltica en caliente, que juntas suman un total de 30 cm de espesor, una capa de base granular de 30 cm, una subbase de 33 cm de espesor y finalmente la subrasante, el detalle de estos datos se pueden observar en la Figura 90. Adicionalmente, entre la subrasante y subbase se encuentra una microgrilla Macgrid Net como refuerzo.



**Figura 90.** Estructura de pavimento conector Bravo Sur, AIJS

### 3.3.2.1 Aeronave Boeing 777 (salida), 20 febrero del 2020 (noche)

En las figuras siguientes se muestran los registros obtenidos para la aeronave Boing 777 en la condición de salida (carga máxima), esta aeronave se caracteriza por ser de categoría E y contar con 3 pares de ruedas en el tren de aterrizaje trasero.



**Figura 91.** Ejemplo de aeronave Boeing 777

En la Figura 92, se puede observar el registro de presión de un Boeing 777 antes de despegar a nivel de subrasante. En este caso se pueden distinguir los tres pulsos asociados a los tres pares de ruedas del eje trasero, el cual alcanza un máximo de 65kPa, cabe destacar que esta aeronave puede alcanzar un peso máximo de despegue de aproximadamente 300 toneladas.

En la Figura 93 se muestra el registro de presión de a nivel de subbase, en este caso se registró un valor cercano a los 120kPa (17,4 psi).

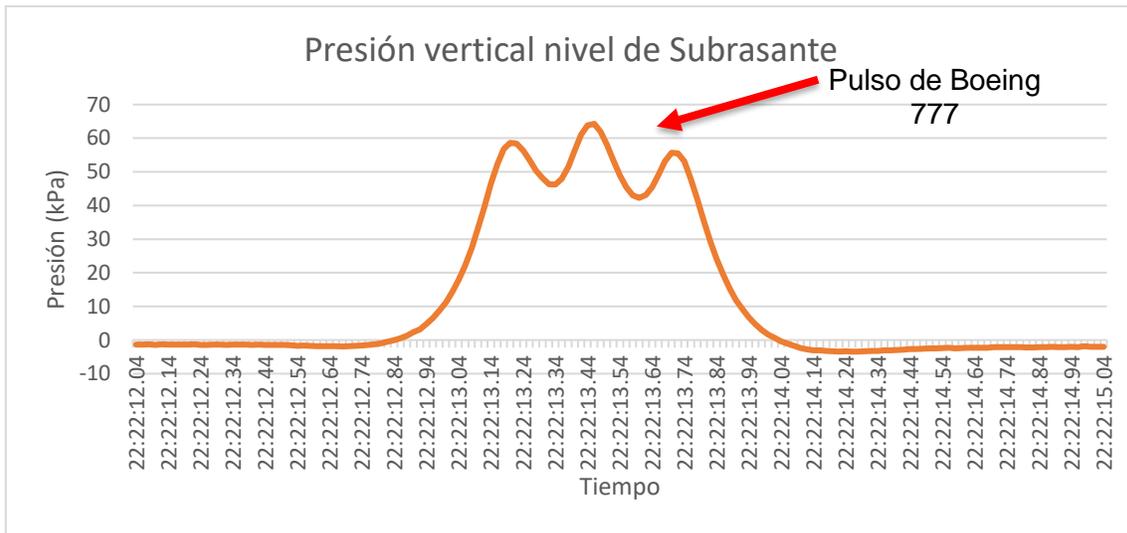


Figura 92. Presión en la subrasante 20/02/2020 (noche)

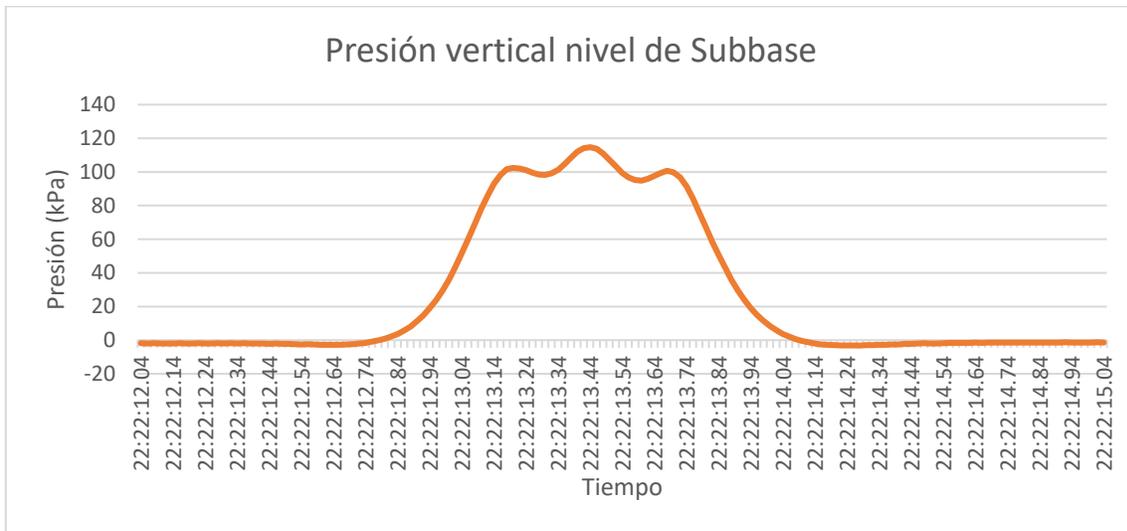
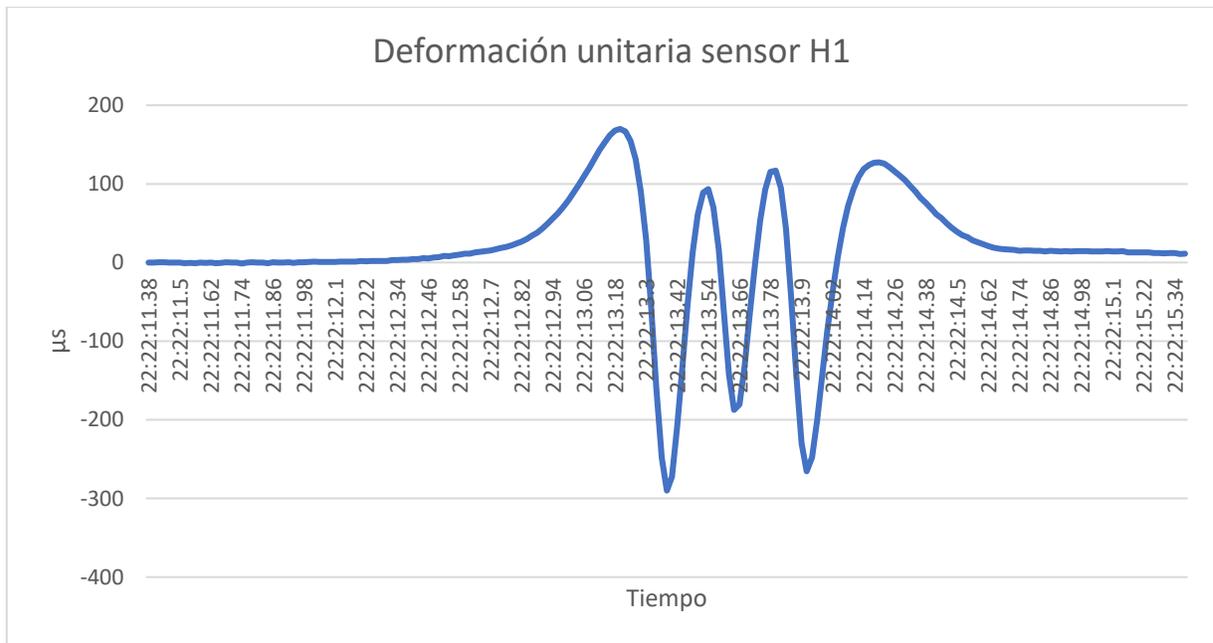


Figura 93. Presión en la subbase 20/02/2020 (noche)



Los registros de deformación unitaria en la fibra inferior de la mezcla asfáltica, para el eje trasero de este Boeing 777-300 se muestra en la Figura 94, donde se muestra un valor máximo a compresión de  $170\mu s$  y máximo a compresión de  $290\mu s$  ( $\Delta$  de cambio de aproximadamente de  $460\mu s$ ), valores importantes para un material como la mezcla asfáltica.



**Figura 94.** Deformación unitaria sensor H1, 20/02/2020 (noche)

### 3.3.2.2 Resumen de datos:

En la Tabla 5 se muestra un resumen de respuestas medidas durante el año 2020 en el conector Bravo Sur, para diferentes tipos de ejes y en la Tabla 6 la estadística resumen para esta zona.

**Tabla 5.** Muestra de datos Bravo-Sur AIJS, pavimento flexible

Sensor	Fecha	Hora	Máximo valor registrado	Cantidad de ejes
H1 ( $\mu s$ )	2020-02-20	12:58:59.425	-30,82	1
H1 ( $\mu s$ )	2020-02-20	13:03:34.825	-77,47	1
H1 ( $\mu s$ )	2020-02-22	14:20:22.64	-48,31	1
Subbase (kPa)	2020-02-20	12:58:59.575	11,97	1



Sensor	Fecha	Hora	Máximo valor registrado	Cantidad de ejes
Subbase (kPa)	2020-02-20	13:03:35.025	33,39	1
Subbase (kPa)	2020-02-22	14:20:22.84	18,39	1
Subrasante (kPa)	2020-02-20	12:58:59.55	4,09	1
Subrasante (kPa)	2020-02-20	13:03:35.025	15,57	1
Subrasante (kPa)	2020-02-22	14:20:22.8	7,15	1
H1 (μs)	2020-02-18	11:55:19.7	-186,73	2
H1 (μs)	2020-02-20	11:46:25.5	-226,78	2
H1 (μs)	2020-02-20	17:13:24.74	-193,12	2
H1 (μs)	2020-02-22	11:36:09.16	-284,87	2
H1 (μs)	2020-02-22	19:04:21.98	-311,07	2
H1 (μs)	2020-02-23	17:24:58.26	-211,68	2
Subbase (kPa)	2020-02-18	11:55:19.85	45,09	2
Subbase (kPa)	2020-02-20	11:46:25.65	63,89	2
Subbase (kPa)	2020-02-20	17:13:24.6	86,00	2
Subbase (kPa)	2020-02-22	11:36:08.64	88,30	2
Subbase (kPa)	2020-02-22	19:04:21.82	71,95	2
Subbase (kPa)	2020-02-23	17:24:58.12	87,70	2
Subrasante (kPa)	2020-02-18	11:55:19.85	88,60	2
Subrasante (kPa)	2020-02-20	11:46:25.65	46,75	2
Subrasante (kPa)	2020-02-20	17:13:24.62	37,42	2
Subrasante (kPa)	2020-02-22	11:36:08.98	58,39	2
Subrasante (kPa)	2020-02-22	19:04:21.84	45,71	2
Subrasante (kPa)	2020-02-23	17:24:58.14	36,88	2
H1 (μs)	2020-02-20	22:22:13.38	-290,00	3
Subbase (kPa)	2020-02-20	22:22:13.44	114,70	3
Subrasante (kPa)	2020-02-20	22:22:13.46	64,28	3



**Tabla 6.** Resumen de datos de la muestra del conector Bravo-Sur AIJS, pavimento flexible

Ejes	Sensor											
	Strain fibra Inferior de la mezcla asfáltica				Subbase				Subrasante			
	$\bar{x}$ ( $\mu$ s)	StdDev	C.D	C.V	$\bar{x}$ (kPa)	StdDev	C.D	C.V	$\bar{x}$ (kPa)	StdDev	C.D	C.V
1	-52,20	23,57	3,00	0,45	21,25	10,99	3,00	0,52	8,93	5,95	3,00	0,67
2	-235,71	50,92	6,00	0,22	73,82	17,19	6,00	0,23	52,29	19,43	6,00	0,37
3	-290,00	N/A	1,00	N/A	114,70	N/A	1,00	N/A	64,28	N/A	1,00	N/A

Donde:

Desviación estándar = StdDev.  
 Coeficiente de variación = C.V.  
 Cantidad de datos = C.D.  
 Promedio =  $\bar{x}$  .

#### 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El LanammeUCR cuenta con los equipos necesarios para según las necesidades propias del proyecto; sitios de difícil acceso, alta frecuencia de medición, compatibilidad entre equipo remotos y móviles, gestión vía internet de las estaciones, funcionamiento autónomo y transmisión de datos, entre otros.
- Se recopilaron datos reales con diferentes tipos de ejes de carga, asociados a instrumentación instalada dentro de la estructura de pavimento, mediante el uso dispositivos electrónicos que miden cambios de voltaje y cambios de resistencia eléctrica y los transforman a mediciones de uso ingenieril. Estos datos resultaron ser valores esperados según la teoría.
- Se evidenció que el monitoreo de pavimentos en sitio permite dar un seguimiento de las respuestas a corto y mediano plazo de las estructuras de pavimento.
- Los procesos de monitoreo en campo presentan una serie de retos únicos en cada proyecto y cada solución debe diseñarse de forma personalizada para optimizar el manejo de información, calidad de los datos recolectados y donde se prevean aspectos como cambios de señalamiento y redundancia de sensores.



- La información recopilada y procesada representa una cantidad importante de datos que permitirán disponer a futuro una base de datos robusta que puede utilizarse para mejorar los procesos de estimación de respuesta asociadas al diseño.
- La instrumentación de pavimentos y las mediciones obtenidas son una fuente valiosa de información que permite validar datos de laboratorio, así como estudiar si los métodos actuales de análisis de pavimentos brindan resultados precisos.
- Se recomienda continuar con la recopilación de datos de campo, principalmente en sitios instrumentados sobre la red vial nacional, ya que estas rutas presentan alta variabilidad de cargas y es necesario aumentar la cantidad de registros para identificar de mejor forma las respuestas típicas.

## REFERENCIAS

1. Apogee Instruments. (Sin fecha). Apogee ultra violet sensor. SU-100-SS.
2. Arias, E. y Wang, S. (2019). Instrumentación de estructuras de pavimento. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales: Unidad de Materiales y Pavimentos.
3. Arias, E. (2020). Monitoreo del desempeño de pavimentos a largo plazo en Costa Rica (DPLP-CR), Informe de avance. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales: Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte.
4. Camacho, E. y Arias, E. (2018). Informe de avance. Fase 1 ensayo acelerado a escala natural de pavimentos. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales: Unidad de Materiales y Pavimentos.
5. Campbell Scientific, Inc. (2013, 6 de diciembre). CRBasic Features. [Archivo de video]. Recuperado de [https://www.youtube.com/watch?v=LndU6Z5nhv8&feature=emb\\_rel\\_pause](https://www.youtube.com/watch?v=LndU6Z5nhv8&feature=emb_rel_pause)
6. Campbell Scientific, Inc. (2017). CRBasic Editor. Stand-Alone Installation for CRBasic Editor. Recuperado de <https://www.campbellsci.com/crbasiceditor>
7. Camacho-Garita, E., Aguiar-Moya, J., Ávila-Esquivel, T., & Loría-Salazar, L. (2019). Effect of Moisture on Full-Scale Pavement Distress. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(1), 235-246. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/JTE20180902>
8. Federal Highway Administration. (2015). Evaluation of LTPP Climatic Data for Use in Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Calibration and Other Pavement Analysis. Publicación No. FHWA-HRT-15-019.

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 101 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



9. Federal Highway Administration. (2017). Long-Term Pavement Performance. Information Management System. User Guide. Publicación No. FHWA-RD-03-088.
10. Federal Highway Administration. (2017). LTPP Climate Tool. Publicación No. FHWA-HRTM 2444, Pub 17-011.
11. Gutiérrez, T. & Arce, M. (2005). Variación estacional de módulos. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
12. Instituto Meteorológico Nacional. (2020). IMN: ¿Quiénes somos? Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/inicio>
13. Leiva, F. Aguiar, J. y Camacho, E. (Diciembre, 2016). Simulación de variables climáticas en ensayos de daño acelerado de pavimentos a escala natural. Revista Infraestructura Vial LanammeUCR. Volumen (18). pp-20-29.
14. Perera, A. (2015). Determinación y análisis de los factores climáticos críticos para el diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Tesis de grado para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería Civil.
15. Wang, S. (2018). Metodología de adquisición y procesamiento de la respuesta de pavimentos a partir de la instrumentación existente en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. Universidad de Costa Rica. Tesis de grado para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería Civil.
16. Carcialprocer. (2015). Planificación y Gestión de la Infraestructura Vial 12 | Evaluación técnica de Pavimentos 1 | Criterios de Tramificación. Tres Ingenieros. Recuperado de <https://www.tresingenieros.com/planificacion-y-gestion-de-la-infraestructura-vial/planificacion-y-gestion-de-la-infraestructura-vial-12-evaluacion-tecnica-de-pavimentos-1-criterios-de-tramificacion/>
17. FinalTest (2010). ¿Qué es un Datalogger?. Recuperado de <https://www.finaltest.com.mx/product-p/art-4.htm>
18. Bosque, D. (2015, 7 de setiembre). Construcción de aeropuerto en Orotina sufre nuevo traspie. La Nación. Recuperado de <https://www.nacion.com/el-pais/infraestructura/construccion-de-aeropuerto-en-orotina-sufre-nuevo-traspie/QNEONYWUNZFYXOFF43XMCS4EHM/story/>
19. JH-Soluciones integrales. (2011). Estructura de Pavimento. Recuperado de [https://www.sioingenieria.com/sitio/contenidos\\_mo.php?it=556](https://www.sioingenieria.com/sitio/contenidos_mo.php?it=556)

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 102 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



20. Unidad de materiales y pavimentos del programa de infraestructura del transporte. (2014). Propuesta plan de trabajo inicial equipo para ensayo acelerado de pavimentos (hvs). Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/255/lm-pi-ump-004-p%20propuesta%20plan%20de%20trabajo%20inicial%20equipo%20para%20ensayo%20acelerado%20de%20pavimentos%20%28hvs%29.pdf?sequence=1&isallowed=y>
21. Wang Qui, S. Q. (2018). Metodología de adquisición y procesamiento de la respuesta de pavimentos a partir de la instrumentación existente en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. [Proyecto de Graduación para la obtención del grado de Licenciatura en Ingeniería Civil]. Universidad de Costa Rica: San José.



## ANEXOS

### *Anexo A: Especificaciones técnicas equipos utilizados*

**Tabla A 1. Especificaciones del Enlace celular industrial 4G LTE (RV50)**

Tecnología de red	4G (con retroceso automático a 3G y 2G)
Conectores RF	3 conectores hembra SMA (para celular primario y diversidad celular opcional y GPS)
Rango de temperatura de funcionamiento	-30 ° a + 70 ° C
Interfaz de anfitrión	10/100/1000 Ethernet RJ45 RS-232 Serial DTE DB9 Hembra USB 2.0 Micro-B
Dimensiones	1,9 x 9,4 x 3,4 cm (4,69 x 3,7 x 1,34 pulg.)
Peso	320 g (11,3 oz)
WAN celular - Modelo norteamericano (-NA)	
Aprobación	Verizon, AT&T, Sprint, T-Mobile USA, Rogers, Bell, Telus
LTE	1900(B2), AWS(B4), 850(B5), 700(B13), 700(B17), 1900(B25)
WCDMA	2100(B1), 1900(B2), AWS(B4), 850(B5), 900(B8)
EV-DO/CDMA	800(BC0), 1900(BC1), 1700(BC10)
GSM/GPRS/EDGE	Quad-band
Aprobaciones de la industria	FCC, IC, PTCRB
Tipo de radio	Definido por software (con cambio automático de operador de red)
Interfaces	Interfaces SIM dobles
WAN celular - Modelo internacional (-INT)	
LTE	2100 (B1), 1800 (B3), 2600 (B7), 900 (B8), 800 (B20)
WCDMA	2100(B1), 1900(B2), 850(B5), 900(B8)
GSM/GPRS/EDGE	Quad-band



Aprobaciones de la industria	CE, RCM, GCF, R&TTE
Tipo de radio	Definido por software (con cambio automático de operador de red)
Interfaces	Interfaces SIM dobles (2FF)

**Tabla A 2. Especificaciones de la cámara CCFC**

Temperatura de funcionamiento	-40° a +60°C
Peso	2,38 kg (5,25 lb)
Longitud	28,4 cm (11,2 in)
Altura	13,0 cm (5,1 in)
Ancho	13,2 cm (5,2 in)
Precisión del reloj	± 2 min / año (-40 ° a + 60 ° C)
Protección de ingreso	67
Potencia de funcionamiento	9 a 30 Vdc
Corriente de drenado	
Promedio	250 mA (excluye descongelador y LED IR)
Pico Momentáneo Máximo	400 mA
Descongelador encendido	1,5 A
LED IR encendidos:	700 mA
Inactivo (modo apagado)	<1 mA
Modo de reposo profundo	<6 mA
Lente	
Longitud focal	4,70 a 64,6 mm
Campo de visión	4° a 67,3°
Relación de zoom	18x
Cable	



Longitud máxima recomendada	Cable de alimentación y de I/O: 20 m (65 pies) Cable Ethernet: 70 m (230 pies)
Captura de media (foto y video)	
Disparadores de captura de imagen o video	Dos temporizadores independientes; disparador externo; detección de movimiento; control de la página web
Resoluciones programables de imágenes fijas (JPEG)	2592 x 1944; 1280 x 960; 1280 x 720; 640 x 480; 640 x 352; 320 x 240; 320 x 176
Video	Capacidad de hasta 720P para 1280 x 720 (MPEG4), 640 x 480 (MJPEG), 320 x 240 (MPEG4)
Opciones de velocidad de video	30, 15 y 7,5 cuadros por segundo
Tiempo de captura de fotos y videos	Parcialmente encendido y modos de sueño profundo: 10 s Modo apagado: 90 s

**Tabla A 3. Especificaciones de los módulos de medición analógica**

Requerimientos de energía	
Voltaje	9.6 a 32 Vdc
Exactitud estimada	$\pm (0,04\%$ de lectura + desplazamiento), $0^\circ$ a $40^\circ$ C
	$\pm (0,06\%$ de lectura + desplazamiento), $-40^\circ$ a $70^\circ$ C
	$\pm (0,08\%$ de lectura + desplazamiento), $-55^\circ$ a $85^\circ$ C
Salidas de excitación de voltaje / corriente	
Excitación de voltaje	$\pm 5$ V @ 50 mA
Excitación de corriente	$\pm 2,5$ mA; voltaje de cumplimiento de $\pm 5$ V
Número de salidas de excitación de voltaje / corriente	2 (CDM-A108), 4 (CDM-A116)
Salidas de uso general para control AM16 / 32B o alimentación del sensor	
Salidas SW5V	
Cantidad de salidas	2 (CDM-A108), 4 (CDM-A116)
Resistencia de salida	40 $\Omega$
Salidas SW12V	
Cantidad de salidas	1 (CDM-A108), 2 (CDM-A116)



Límite Típico	200 mA
Límite mínimo	180 mA
Salidas de 12V	
Cantidad de salidas	1 (CDM-A108), 2 (CDM-A116)
Límite Típico	200 mA
Límite mínimo	180 mA
Comunicación	
CPI	Para la conexión del registrador de datos. Velocidad de transmisión seleccionable de 50 kbps a 1 Mbps. La longitud de cable permitida varía según la velocidad de transmisión, la cantidad de nodos, la calidad del cable y el entorno de ruido, pero puede ser de hasta 700 m en condiciones adecuadas.
USB	Conexión USB 2.0 de alta velocidad disponible para conectar a una PC. El puerto se utiliza para configurar el módulo y descargar actualizaciones a través de la Utilidad de configuración de dispositivos.
Físico	
Dimensiones	20,3 x 12,7 x 5,1 cm (8 x 5 x 2 pulg.)
Montaje	Estándar de 1 pulg. cuadrícula; Montaje en riel DIN disponible
Temperatura de funcionamiento	-40 ° a + 70 ° C (estándar), -55 ° a + 85 ° C (extendido)

**Tabla A 4. Especificaciones del CR6**

Par de terminales de carga	para 16 a 32 V desde convertidor de corriente continua o panel solar de 12 o 24 V
Dos terminales de 12 V conmutados	para alimentar sensores o dispositivos de comunicación, 1100 mA @ 20 ° C
Doce terminales universales (U)	
Funciones analógicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entradas analógicas: 12 diferenciales individuales o 6 diferenciales con <math>\pm 5000</math> mV, <math>\pm 1000</math> mV, <math>\pm 200</math> mV rangos 24 bit ADC</li> <li>• Salidas analógicas: rangos de <math>\pm 2.5</math> V o <math>\pm 2.5</math> mA para mediciones de puente DAC de 12 bits</li> <li>• Cable vibratorio de frecuencia estática analizada: el par de terminales excita tanto a 12 V p-p como a 100 Hz a</li> </ul>

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 107 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



	<p>6.5 kHz y lee transductores de cable vibratorio utilizando nuestra tecnología patentada de análisis espectral (VSPECTTM)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Termistor: resistencia de terminación interna 5 k<math>\Omega</math></li> <li>• Periodo promedio: hasta 200 kHz, dependiente de la amplitud</li> </ul>
Funciones de I/O digital	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estado general / control</li> <li>• Fuente de voltaje: 5 V, 3.3 V, 20 mA a 3.5 V</li> <li>• CA de bajo nivel: hasta 20 kHz, dependiente de la amplitud</li> <li>• Interruptor de cierre (150 Hz) o contador de alta frecuencia (1 MHz)</li> <li>• Modulación de ancho de pulso</li> <li>• Interrupciones y entrada de temporizador</li> <li>• SDI-12 y SDM</li> <li>• Comunicación asíncrona en serie Tx / Rx pares</li> </ul>
Cuatro terminales de control (C): Funciones de I/O digital	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RS-232 / RS-485: dúplex medio o completo</li> <li>• Estado general / control</li> <li>• Fuente de voltaje 5 V, 3.3 V: 10 mA a 3.5 V</li> <li>• Interruptor de cierre (150 Hz) o contador de alta frecuencia (1 MHz)</li> <li>• Modulación de ancho de pulso</li> <li>• Interrupciones y entrada de temporizador</li> <li>• SDI-12 y SDM</li> <li>• Comunicación asíncrona en serie Tx / Rx pares</li> </ul>
Precisión analógica	$\pm (0,04\%$ de lectura + 2 $\mu$ V), 0 ° a 40 ° C
Resolución efectiva	50 nV (rango $\pm$ 200 mV, medición diferencial, inversión de entrada, 5 Hz $f_{N1}$ )
Rango de temperatura de funcionamiento	<p>Estándar: -40 ° a + 70 ° C</p> <p>Extendido: -55 ° a + 85 ° C (no disponible para opciones de comunicación)</p>
Información de cumplimiento	<p>Declaración de conformidad para el choque CR6, CR6-WIFI y CR6-RF422: método MIL-STD 810G 516.6</p> <p>Vibración: método MIL-STD 810G 514.6</p> <p>Protección: IP50</p>
Peso	<p>CR6: 0,2 kg (0,92 lb)</p> <p>CR6-WIFI: 0,50 kg (1,10 lb)</p> <p>CR6-RF451: 0,52 kg (1,15 lb)</p> <p>CR6-RF407/RF412/RF422/RF427: 0,51 kg (1,13 lb)</p>
Dimensiones	21 x 10,2 x 5,7 cm (8,3 x 4,0 x 2,2 pulg.)



**Tabla A 5. Especificaciones del CR310**

Rango de temperatura de operación	-40° a +70°C (estándar), en ambientes sin condensación
Material	Aluminio con recubrimiento en polvo
Entradas análogas	6 diferenciales individuales o 3 diferenciales (configurados individualmente)
Contadores de pulso	8 (P_SW, P_LL, C1, C2, and SE1 toSE4)
Terminales de excitación de voltaje	2 (VX1, VX2)
Puertos de comunicaciones	USB Micro B, 10/100 Ethernet RJ45, RS-232
Cambiado a 12 volt	1 terminal
I/O digital	7 terminales (C1, C2, P_SW y SE1 a SE4) configurables para entrada y salida digital. Incluye estado alto / bajo, modulación de ancho de pulso, interrupción externa y funciones de comunicación. Excepción: el terminal SE4 no hace interrupción externa.
Límites de entrada	-100 a +2500 mV
Exactitud de voltaje analógico	± (0.04% de medición + compensación) a 0 ° a 40 ° C. Las especificaciones de precisión no incluyen el sensor o el ruido de medición. ± (0.1% de la medición + compensación) de -40 ° a + 70 ° C
ADC	24 bit
Requerimiento de energía	16 a 32 Vcc para entrada de cargador (CHG)
Precisión de reloj en tiempo real	± 1 min. por mes
Protocolos de internet	Ethernet, PPP, RNDIS, ICMP/Ping, Auto-IP(APIPA), IPv4, IPv6, UDP, TCP, TLS, DNS, DHCP, SLAAC, NTP, Telnet, HTTP(S), FTP(S), SMTP/TLS, POP3/TLS
Protocolos de comunicación	PakBus, Modbus, DNP3, SDI-12, TCP, UDP y otros
Garantía	3 años (contra defectos en materiales y mano de obra)
Unidad de CPU / Programas	80 MB
Almacenamiento de datos	30 MB
Drenaje de corriente inactiva, promedio	32 mA (@ 12 Vdc con linkidle Ethernet)
Drenaje de corriente activo, promedio	23 mA + 51 mA (@ 12 Vcc con enlace Ethernet activo, procesador siempre encendido)
Dimensiones	16.26 x 7.62 x 5.68 cm (6.4 x 3.0 x2.2 in.)

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 109 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



Peso	288 a 306 g (0,64 a 0,68 lb) según la opción de comunicación seleccionada
Tipo de radio	Espectro extendido de salto de frecuencia (FHSS)
Potencia de salida	5 a 250 mW (seleccionable por el usuario)
Frecuencia	902 a 928 MHz (USA, Canada) y 915 a 928 MHz (Australia, Nueva Zelandia)
Tasa de datos de RF	200 kbps
Recibido de sensibilidad	-101 dBm
Conector de antena	RPSMA (se requiere antena externa)
Drenaje de corriente inactiva, promedio	12 mA (@ 12 Vdc)
Drenaje de corriente activo, promedio	< 80 mA (@ 12 Vdc)

**Tabla A 6. Especificaciones del recinto Enc8/10**

Color	Blanco (refleja la radiación solar, reduciendo el gradiente de temperatura dentro del recinto sin usar un escudo de radiación separado)
Clasificación de recinto	NEMA 4X (antes de ser modificado para entrada de cable, conducto o toma de tierra)
Construcción	Recinto de poliuretano reforzado con fibra de vidrio con empaques en la puerta, terminal de conexión a tierra externo, bisagra de acero inoxidable y con cerradura
Dimensiones	24,8 x 19,7 x 15,9 cm (9,7 x 7,7 x 6,3 pulgadas) interno 30,4 x 23,9 x 16,5 cm (12,0 x 9,4 x 6,5 pulgadas) externo
Peso	2,36 kg (5,2 lb)

**Tabla A 7. Especificaciones batería (BP7)**

Tipo de batería	Recargable
Número de archivo de aprobación UL	MH16464
Voltaje de salida	12 Vdc
Calificación nominal	7 Ah
Longitud del cable	45.7 cm (18 in.)

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 110 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



Dimensiones	15 x 9.4 x 6.4 cm (5.9 x 3.7 x 2.5 in.)
Peso	2.72 kg (6 lb)

**Tabla A 8. Especificaciones del ClimaVUE 50**

Salida	SDI-12
Rango de temperatura de funcionamiento	-50° to +60°C
Voltaje de suministro mínimo	3,6 Vdc continua
Voltaje de suministro máximo	15,0 Vdc continua
Voltaje mínimo de entrada digital	2.8 V (lógica alta) -0.3 V (lógica baja)
Voltaje de entrada digital típico	3.0 V (lógica alta) 0.0 V (lógica baja)
Voltaje Máximo de Entrada Digital	15 V (lógica alta) 0.8 V (lógica baja)
Duración de medición típica	110 ms
Duración máxima de medición	3,000 ms
Aplicación de la(s) directiva(s) del Consejo	2011/65 / UE: Restricciones de la Directiva de Sustancias (RoHS2) 2014/30 / UE: Directiva de compatibilidad electromagnética (EMC)
Estándares a los cuales se declara la conformidad	EN 61326-1: 2013: equipo eléctrico para medición, control y uso en laboratorio (requisitos de compatibilidad electromagnética) para uso en ubicaciones industriales EN 50581: 2012: documentación técnica para la evaluación de productos eléctricos y electrónicos con respecto a la restricción de sustancias peligrosas
Díámetro	10 cm (4 pulg.) Incluyendo el pluviómetro
Altura	34 cm (13.4 pulg.) Incluido el pluviómetro



**Tabla A 9.** Especificaciones de los sensores del *ClimaVUE 50*

Consumo de energía	
Inactivo	0,3 mA
Corriente pico máxima	33 mA
Promedio usando el comando R0! Cada 10 s	1,0 mA
Promedio usando el comando R0! Cada 60 s (o más lento)	0,4 mA
Temperatura del aire	
Rango de mediciones	-50° a +60°C
Resolución	0,1°C
Precisión	±0,6°C
Humedad relativa	
Rango de mediciones	0 a 100%
Resolución	0,1
Precisión	±3% RH típico (varía con temperatura y humedad)
Presión barométrica	
Rango de mediciones	500 a 1100 hPa
Resolución	0,1 hPa
Precisión	±1 hPa
Velocidad del viento	
Rango de mediciones	0 a 30 m s <sup>-1</sup>
Resolución	0,01 m s <sup>-1</sup>
Precisión	0,3 m s <sup>-1</sup> o 3% (lo que sea mayor)
Dirección del viento	
Rango de mediciones	0° a 359°
Resolución	1°
Precisión	±5°



Radiación solar	
Rango de mediciones	0 a 1750 W m <sup>-2</sup>
Resolución	1 W m <sup>-2</sup>
Precisión	± 5% de medición (típico)
Precipitación	
Rango de mediciones	0 a 400 mm hr <sup>-1</sup>
Resolución	0,017 mm
Precisión	± 5% de medición (de 0 a 50 mm hr <sup>-1</sup> )
Inclinación	
Rango de mediciones	-90° a +90°
Resolución	0,1°
Precisión	±1°
Contador de rayos	
Rango de mediciones	0 a 65 535 rayos
Resolución	1 rayo
Precisión	> 25% de detección a <10 km típico (variable con la distancia)
Distancia promedio de rayo	
Rango de mediciones	0 to 40 km
Resolución	3 km
Precisión	Variable

**Tabla A 10. Especificaciones del SU-100-SS**

Salida (sensibilidad)	0.2 mV por $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; 0,61 mV por W m <sup>-2</sup>
Factor de calibración (recíproco de salida)	5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por mV; 1,65 W m <sup>-2</sup> por mV
Incertidumbre de calibración	± 10%



Repetibilidad de medida	Menos de 1 %
Deriva a largo plazo (no estabilidad)	Menos del 3% por año
No linealidad	Menos del 1% (hasta 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
Tiempo de respuesta	Menos de 1 ms
Rango espectral	250 nm a 400 nm
Campo de visión	180°
Respuesta direccional (coseno)	$\pm 10\%$ a un ángulo cenital de 75 °
Respuesta de temperatura	Aproximadamente 0.1% por C
Entorno operativo	-40 a 70 C, 0 a 100% de humedad relativa
Dimensiones	24 mm de diámetro, 28 mm de altura
Masa	75 g (con 5 m de cable)
Cable	5 m de cable blindado de par trenzado; Chaqueta TPR (alta resistencia al agua, alta estabilidad a los rayos UV, flexibilidad en condiciones de frío); espiga de cable flexible conector de acero inoxidable
Garantía	4 años contra defectos en materiales y mano de obra

**Tabla A 11. Especificaciones del reflectómetro**

Mediciones realizadas	Conductividad eléctrica del suelo (EC), permitividad dieléctrica relativa, contenido de agua volumétrica, temperatura del suelo
Equipo requerido	Sistema de medida
Idoneidad del suelo	Las varillas cortas son fáciles de instalar en suelos duros. Adecuado para suelos con mayor conductividad eléctrica.
Varillas	No reemplazable
Sensores	No intercambiable
Volumen de detección	3600 cm <sup>3</sup> (~ 7.5 cm de radio alrededor de cada varilla de sonda y 4.5 cm más allá del extremo de las varillas)
Electromagnético	Cumple con CE (cumple con los requisitos de EN61326 para la protección contra descargas electrostáticas y sobretensiones).



Rango de temperatura de funcionamiento	-50 ° a + 70 ° C
Salida del sensor	SDI-12; serie RS-232
Tiempo de calentamiento	3 s
Tiempo de medición	3 ms para medir; 600 ms para completar el comando SDI-12
Requisitos de suministro de energía	6 a 18 Vdc (debe poder suministrar 45 mA @ 12 Vdc)
Longitud máxima del cable	Longitud combinada de 610 m (2000 pies) para hasta 25 sensores conectados al mismo puerto de control del registrador de datos
Espaciamiento de varilla	32 mm (1,3 pulg.)
Grado de protección de entrada	IP68
Diámetro de la varilla	3,2 mm (0,13 pulg.)
Longitud de la barra	120 mm (4.7 pulg.)
Dimensiones del cabezal de la sonda	85 x 63 x 18 mm (3,3 x 2,5 x 0,7 pulg.)
Peso del cable	35 g por m (0.38 oz por pie)
Peso de la sonda	240 g (8.5 oz) sin cable

**Tabla A 12. Variables determinadas con el reflectómetro**

Corriente de drenado	
Activo (3 ms)	45 mA típico (@ 12 Vdc) 80 mA (@ 6 Vdc) 35 mA (@ 18 Vdc)
Inactivo	135 µA típico (@ 12 Vdc)
Conductividad eléctrica	
Rango para la solución EC	0 a 8 dS/m
Rango para EC bruta	0 a 8 dS/m
Exactitud	± (5% de lectura + 0.05 dS / m)
Precisión	0,5% de BEC



Permitividad dieléctrica relativa	
Rango	1 a 81
Exactitud	$\pm$ (3% de lectura + 0,8) de 1 a 40 para solución $EC \leq 8$ dS / m $\pm 2$ (de 40 a 81 para solución $EC \leq 2,8$ dS / m)
Precisión	< 0,02
Contenido volumétrico de agua	
Rango	0 a 100% (con comando M4)
Exactitud	$\pm 1\%$ (con calibración específica del suelo) donde la solución $EC < 3$ dS / m $\pm 3\%$ (típico con el modelo VWC de fábrica) donde la solución $EC < 10$ dS / m
Precisión	< 0,05%
Temperatura del suelo	
Rango	-50° a +70°C
Resolución	0,001°C
Exactitud	$\pm 0,1$ ° C (para temperaturas típicas del suelo [0 a 40 ° C] cuando el cuerpo de la sonda está enterrado en el suelo) $\pm 0,5$ ° C (para rango de temperatura completo)
Precisión	$\pm 0,02$ °C

### ***Anexo B.1: Procedimiento de configuración de la comunicación***

El procedimiento necesario para configurar el Loggernet y obtener una comunicación inalámbrica, ya sea por red pública o red privada, con el equipo, se detalla en los siguientes apartados.

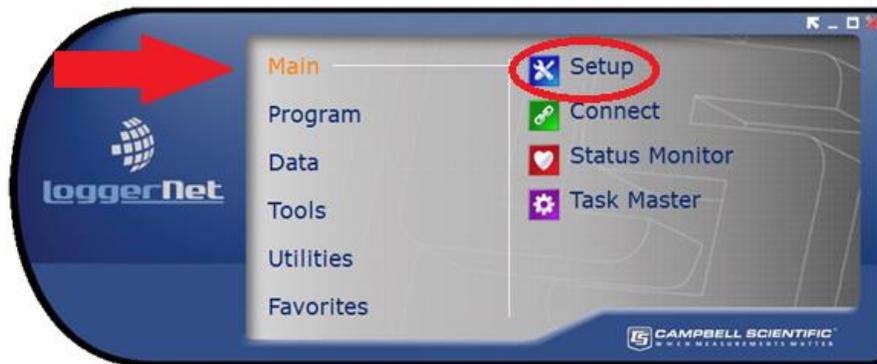
#### ***Red pública***

Seleccione, desde la ventana de escritorio, el acceso directo correspondiente a la aplicación LoggerNet. Este acceso, debe lucir como el mostrado en la Figura B1.1, si se posee la versión 4. 5. 0. 1.



***Figura B1.1.*** Icono de software LoggerNet versión 4. 5. 0. 1

Seguidamente, se desplegará un menú de inicio como el mostrado en la Figura B1.2. En este, se debe de acceder a la pestaña “Setup” en el apartado “Main”.



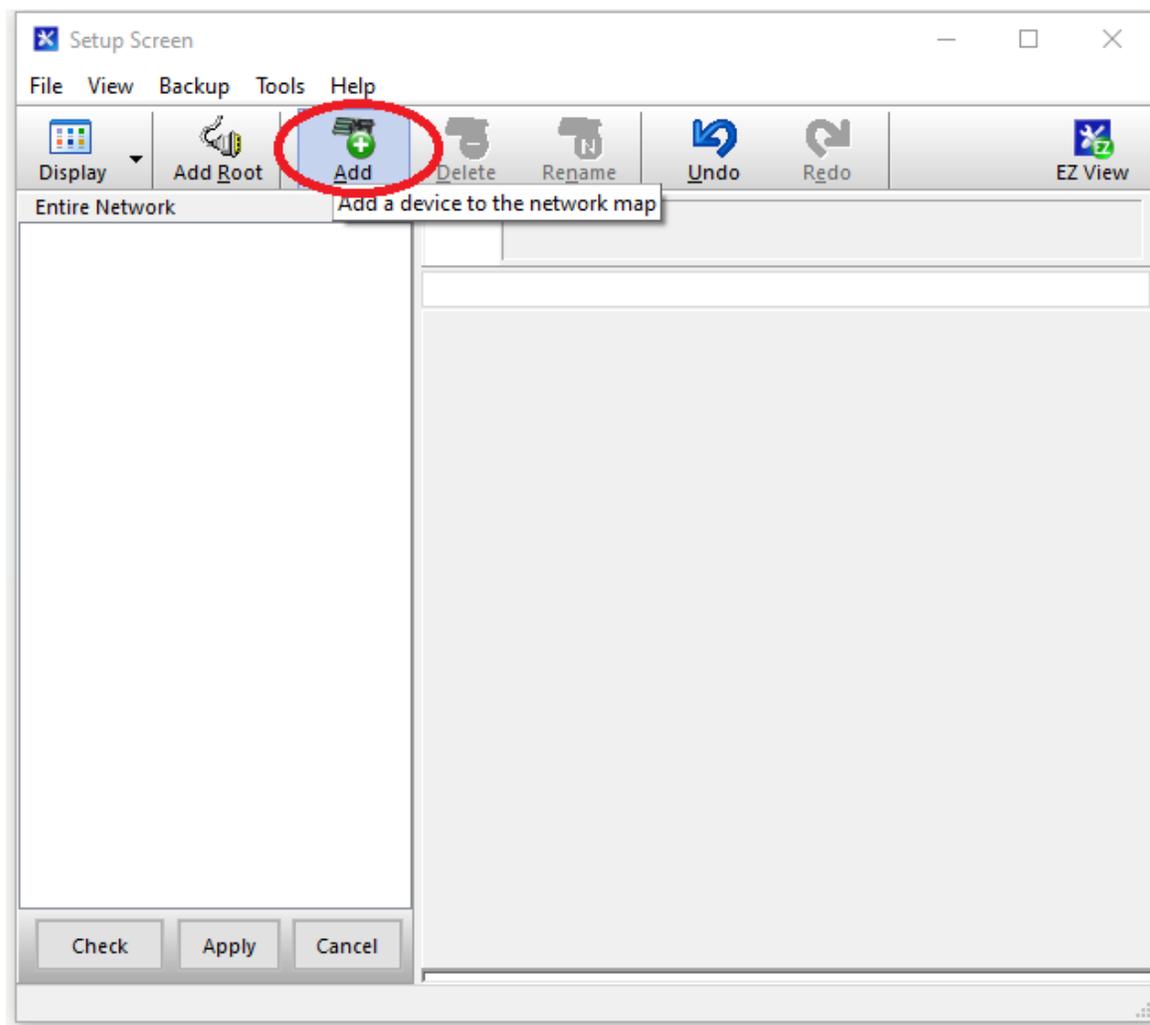
***Figura B1.2.*** Menú principal de software LoggerNet (configuración)

Es importante verificar que se abra el menú avanzado, el cual debe lucir como se muestra en la Figura B1.4. Si fuese el caso que se despliega el menú simplificado, dirjase a la esquina superior derecha de la ventana y active el “Std View” para pasar del menú simplificado a el menú avanzado. Esta pestaña luce tal y como se muestra en la Figura B1.3.



**Figura B1.3.** Icono de activación del menú avanzado

Una vez se tenga abierto el menú avanzado, diríjase a la barra de herramientas y seleccione “Add a device to the network map”.

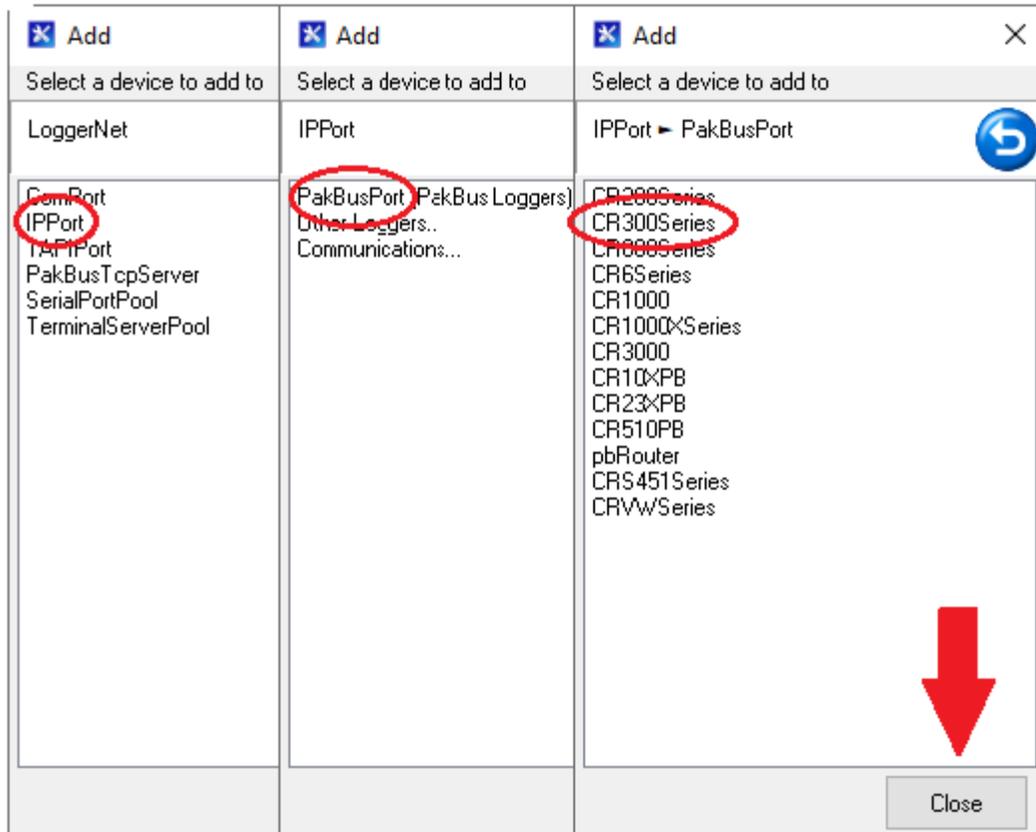


**Figura B1.4.** Ventana de configuración avanzada

En seguida se abrirá la pestaña “Add”. Como se está configurando para una conexión vía IP pública, se debe seguir los siguientes pasos (ver Figura B1.5), hasta que la pestaña luzca como la Figura B1.6.

“IPPort” → “PakBusPort” → “CR300Series”

Una vez añadido el sensor, se debe de cerrar la pestaña “Add”, presionando el botón “Close” en la parte inferior derecha de la misma.

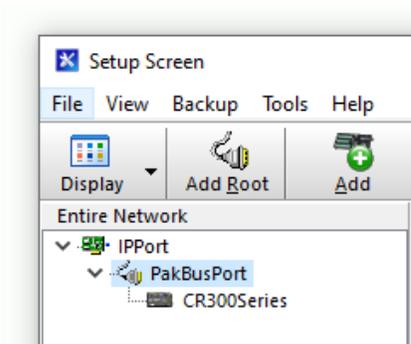


**Figura B1.5.** Serie de pestañas a seleccionar para añadir el sensor



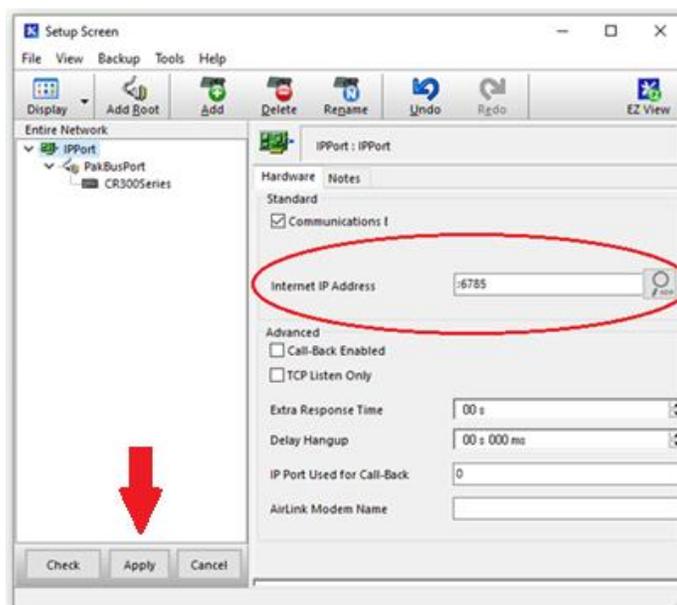
**Figura B1.6.** Ventana, “Add”, correctamente configurada

Regresando al menú avanzado, el apartado “Entire Network” debe lucir como se observa en la Figura B1.7.

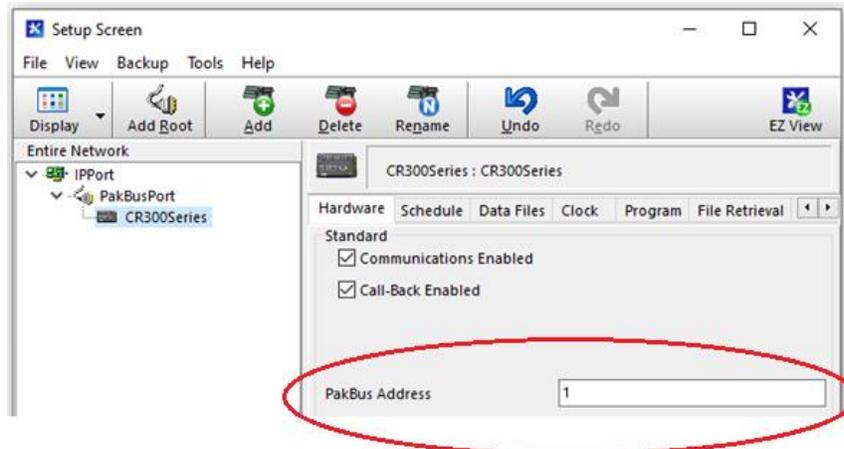


**Figura B1.7.** Resultado gráfico de añadir el sensor correctamente

Una vez verificado que se agregó de forma exitosa el sensor CR300, se debe seleccionar el apartado “IPPort” de la Figura B1.7, para desplegar su menú de edición (como se muestra en la Figura B1.8). Una vez dentro de este, se debe de ingresar la dirección IP correspondiente, en el apartado “Internet IP Address”. Seguidamente, seleccionando el apartado “Cr300Series” mostrado en la figura Figura B1.7 se desplegará un menú de edición (como se muestra en la Figura B1.9). En este menú, en la pestaña “PakBus Address”, se debe de ingresar el “PakBus” correspondiente a este sensor. Ya configurado el “IPPort” y el “Cr300Series”, presione sobre el botón “Apply” ubicado en la parte inferior izquierda (mostrado en la Figura B1.8).



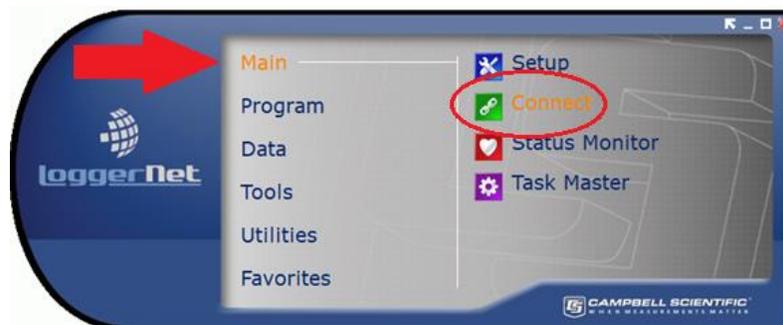
**Figura B1.8.** Ventana de configuración para el “IPPort”



**Figura B1.9.** Ventana de configuración para el “CR300Series”

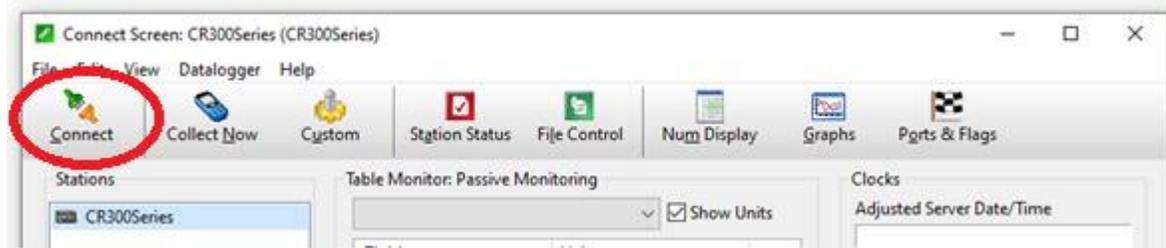
Cierre la pestaña “Setup Screen”.

Para corroborar que la configuración fue exitosa, se puede probar conexión con el sensor. Para esto, redirijase al menú de inicio de Loggernet. En este, se debe de acceder a la pestaña “Connect” en el apartado “Main” (como se muestra en la Figura B1.10).

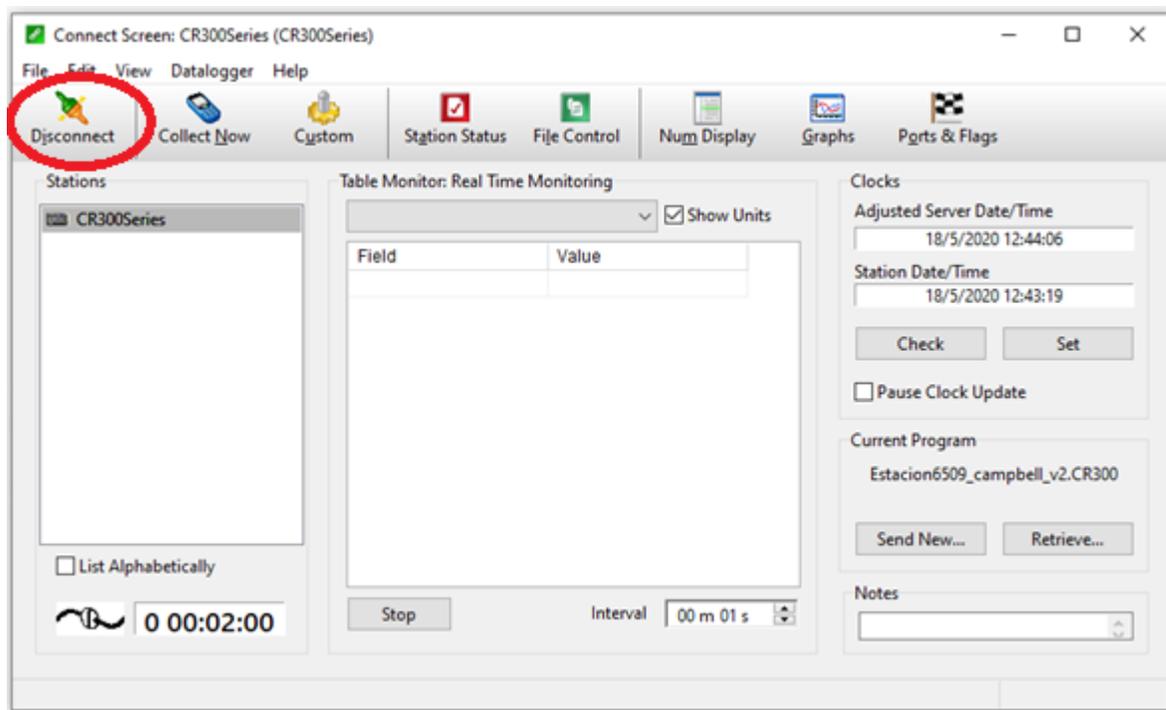


**Figura B1.10.** Menú principal de software Loggernet (conexión)

Una vez se despliegue la ventana mostrada en la Figura B1.11, presione la herramienta “Connect”. La conexión tardara unos minutos si es la primera vez que se establece. Una vez finalizada la conexión, la ventana de “Connect Screen: Cr300Series” debe de lucir como la Figura B1.12.



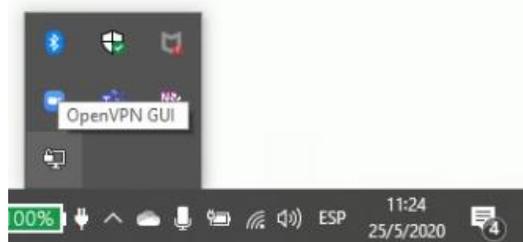
*Figura B1.11.* Conexión con sensores desactivada



*Figura B1.12.* Conexión con sensores activada

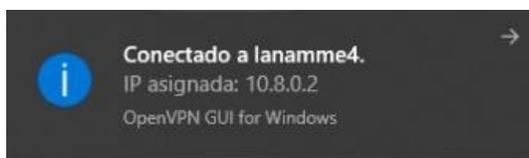
### *Red privada (VPN)*

Para generar una conexión remota por red privada (VPN), se debe de activar una clave de registro (llave que dará acceso a la IP privada). Esta llave será un archivo de tipo “OpenVPN Config File (.ovpn)”, el cual, una vez ejecutado, quedará a la espera de ser activado (como se muestra en la Figura B1.13) para establecer conexión con la red deseada.



**Figura B1.13.** OpenVPN GUI activado – desconectado

Una vez activado, se mostrará un mensaje que indica la llave a la que se conectó la computadora y la IP que esta asigna. El mensaje que debe desplegarse lucirá como el mostrado en la Figura B1.14.



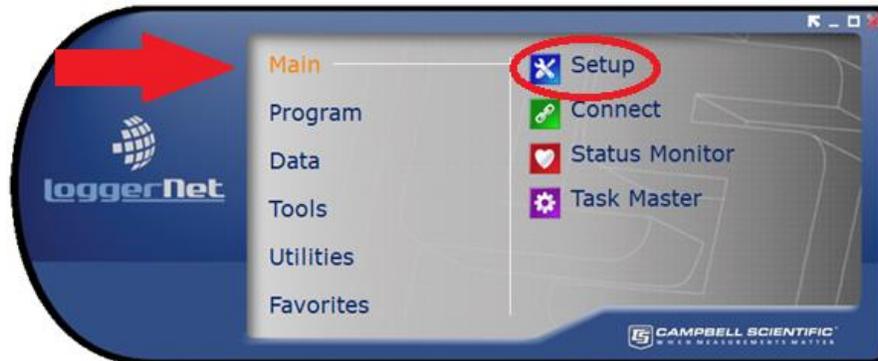
**Figura B1.14.** OpenVPN GUI activado – conectado

Ya asignada una IP al computador, seleccione, desde la ventana de escritorio, el acceso directo correspondiente a la aplicación LoggerNet. Este acceso debe lucir como el mostrado en la Figura B1.15 si se posee la versión 4. 5. 0. 1.



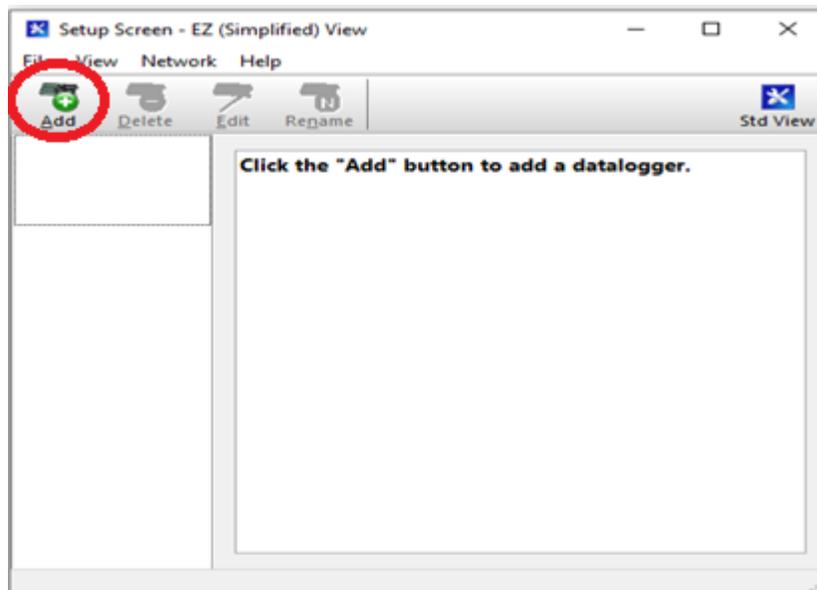
**Figura B1.15.** Icono de software LoggerNet versión 4. 5. 0. 1

Seguidamente, se desplegará un menú de inicio como el mostrado en la Figura B1.10. En este, se debe de acceder a la pestaña “Setup” en el apartado “Main”.



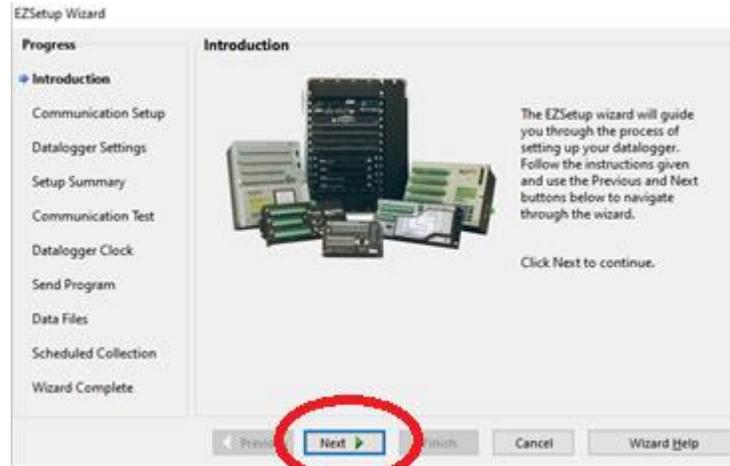
**Figura B1.16.** Menú principal de software LoggerNet (configuración)

Es importante verificar que se abra el menú simplificado, el cual debe lucir como se muestra en la Figura B1.17. En este menú, debe acceder a la pestaña “Add” en la cinta de opciones.



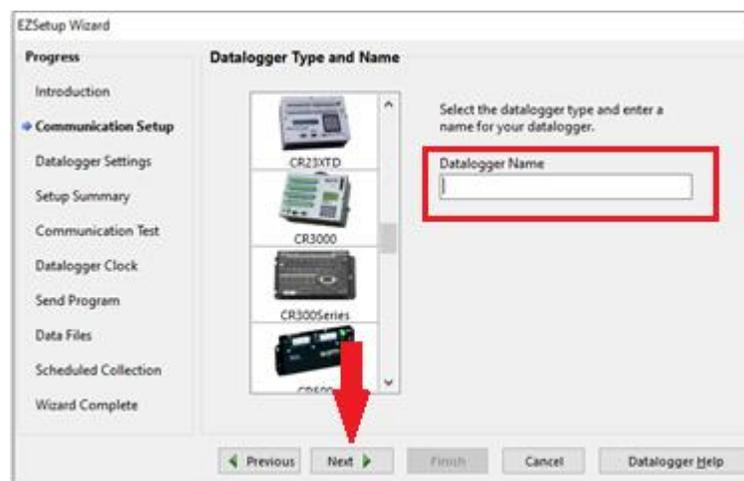
**Figura B1.17.** Ventana de configuración simplificada

Se desplegará la ventana “Asistente de configuración” que luce tal y como se muestra en la siguiente Figura B1.18.



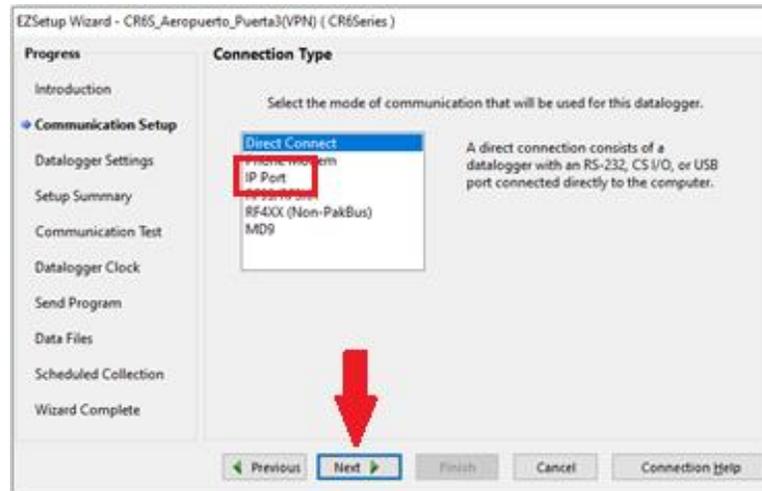
**Figura B1.18.** Ventana de introducción para añadir sensor

Para iniciar la configuración, debe presionar el botón “Next”. Seguidamente, busque y seleccione, dentro de la lista de sensores desplegados, el sensor de interés. Una vez seleccionado, si fuese necesario, asígnele un nombre distinto al otorgado por defecto en el apartado “Datalogger Name”. Ya seleccionado y nombrado el sensor de interés, proceda a la siguiente ventana, presionando sobre el botón “Next” en la parte inferior central.



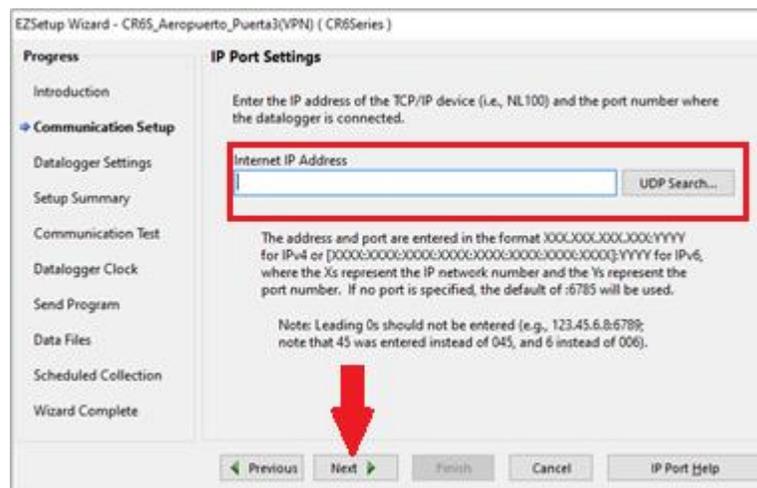
**Figura B1.19.** Selección de sensor a añadir

Posteriormente, se desplegará una ventana como la mostrada en Figura B1.20. En esta, debe de seleccionar la opción que permita conectar mediante un “IP Port”. Una vez seleccionado, presione, nuevamente, sobre el botón “Next”.



**Figura B1.20.** Tipo de conexión del sensor a añadir

En la ventana siguiente, en la casilla de “Internet IP Address”, ingrese la dirección IP correspondiente al sensor que se desea conectar. Una vez indicada la dirección IP, presione el botón “Next”.



**Figura B1.21.** Dirección IP del sensor a añadir

A continuación, en la siguiente ventana, ingrese en la casilla “PackBus Address” la dirección “PackBus” asignada al sistema de interés. Una vez indicada la dirección, presione en el botone “Next”.



**Figura B1.22.** Dirección de PackBus del sensor a añadir

En la ventana siguiente, ver Figura B1.23, asegúrese que el valor predeterminado en la casilla “Security Code” sea 0. Seguidamente, presione en el botone “Next”.



**Figura B1.23.** Código de seguridad del sensor a añadir

Una vez desplegada la ventana “Communication Setup Summary”, el proceso de configuración ha finalizado. En esta ventana, se mostrará un resumen de los valores asignados anteriormente. Una vez verificado que estos valores son los deseados, se debe presionar sobre el botón “Finish”, tal y como se muestra en la Figura B1.24.

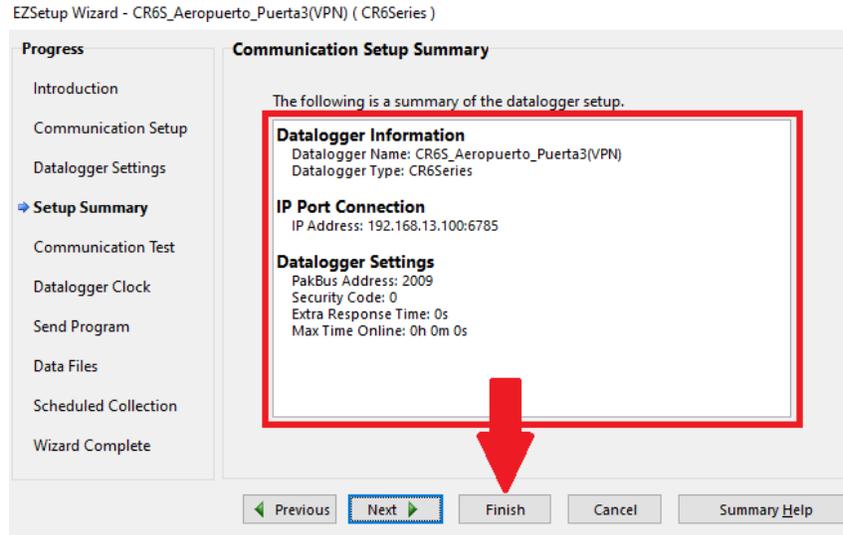


Figura B1.24. Resumen de la configuración del sensor a añadir

De regreso en el menú simplificado, para cada sensor configurado se podrán observar las características que se le asignaron, tales como la dirección IP y la dirección PackBus. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un ejemplo de dos dataloggers de interés configurados.

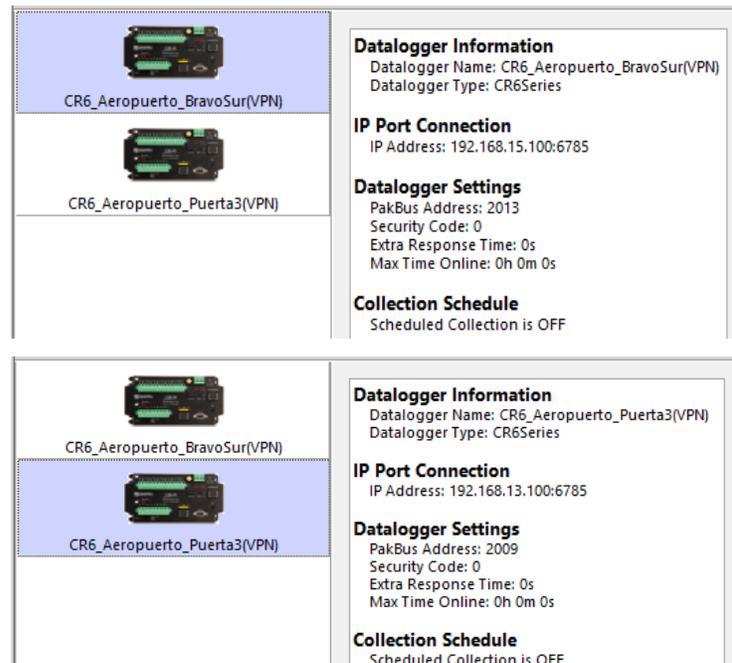
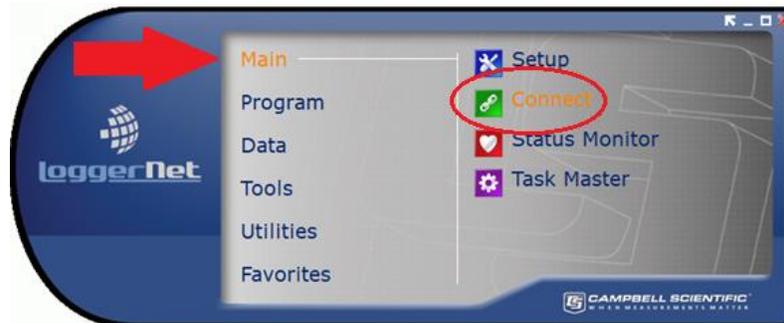


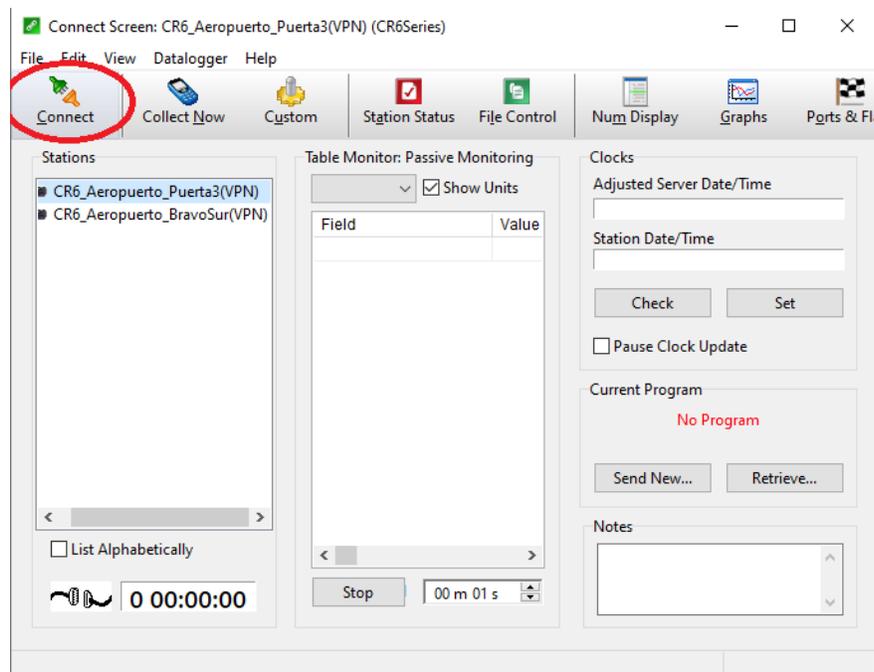
Figura B1.25. Ejemplos de la configuración de sensores de interés

Para corroborar que la configuración fue exitosa, se puede probar conexión con el sensor. Para esto, rediríjase al menú de inicio de Loggernet. En este, se debe de acceder a la pestaña “Connect” en el apartado “Main” (como se muestra en la Figura B1.26).



**Figura B1.26.** Menú principal de software LoggerNet (conexión)

Una vez se despliegue la ventana mostrada en la Figura B1.27, presione la herramienta “Connect”. La conexión tardará unos minutos si es la primera vez que se establece. Una vez finalizada la conexión, la ventana de “Connect Screen: .....” debe de lucir como la Figura B1.28.



**Figura B1.27.** Conexión con sensores desactivada



*Figura B1.28.* Conexión con sensores activada



## Anexo B.2: Programa datalogger CR6, pavimento flexible

CR6 Series

'Declare Variables and Units  
PipeLineMode

Const InicioGrabado = 0  
Const FinalGrabado = 24

Const inicioComunicacion = 7  
Const finalComunicacion = 19  
Dim EstadoComunicacion As Boolean = true  
Dim MinimoBateriaComm = 11.5 'Voltaje minimo de la bateria para poder comunicar

Dim tiempo(9)  
Alias tiempo(4) = hora  
Alias tiempo(5) = minutos  
Alias tiempo(6) = segundos  
Public UmbraldeInicio = 2  
Public UmbraldeFin = 2  
Public Umbral\_Tr = 5  
Dim TriggerDataEvent As Boolean

Public PuertaCerrada As Boolean  
Public HumInterna: Units HumInterna = %

Public CH200Data(9)  
Alias CH200Data(1)=BattV\_CH200  
Alias CH200Data(2)=BattI  
Alias CH200Data(3)=LoadI  
Alias CH200Data(4)=ChgInV  
Alias CH200Data(5)=ChgInI  
Alias CH200Data(6)=ChgTempC  
Alias CH200Data(7)=ChgState  
Alias CH200Data(8)=ChgSource  
Alias CH200Data(9)=ChkBatt  
Units BattV\_CH200=V  
Units BattI=A  
Units LoadI=A  
Units ChgInV=V  
Units ChgInI=A  
Units ChgTempC=Deg C  
Units ChgState=code  
Units ChgSource=code  
Units ChkBatt=code

Public CS450(2)

Alias CS450(1)=Nivel\_m  
Alias CS450(2)=Temp\_C

Units Nivel\_m=meters  
Units Temp\_C=deg C

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 131 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



Public BattV  
 Public FCLoaded  
 Public PTemp\_C  
 Public CRepsQrH1\_Inf  
 Public CRepsQrH2\_Inf  
 Public CRepsQrH3\_Med  
 Public CRepsQrH4\_Med  
 Public CRepsQrH5\_Med  
 Public ZMode  
 Public QBSSMode  
 Public CIndexQrH1\_Inf  
 Public CAvgQrH1\_Inf  
 Public CIndexQrH2\_Inf  
 Public CAvgQrH2\_Inf  
 Public CIndexQrH3\_Med  
 Public CAvgQrH3\_Med  
 Public CIndexQrH4\_Med  
 Public CAvgQrH4\_Med  
 Public CIndexQrH5\_Med  
 Public CAvgQrH5\_Med  
 Public Strain\_H1\_Inf  
 Public Strain\_H2\_Inf  
 Public Strain\_H3\_Med  
 Public Strain\_H4\_Med  
 Public Strain\_H5\_Med  
 Public Vr\_H1\_Inf  
 Public Vr\_H2\_Inf  
 Public Vr\_H3\_Med  
 Public Vr\_H4\_Med  
 Public Vr\_H5\_Med  
 Public GFAdjQrH1\_Inf  
 Public BrZeroQrH1\_Inf  
 Public CKnownQrH1\_Inf  
 Public GFAdjQrH2\_Inf  
 Public BrZeroQrH2\_Inf  
 Public CKnownQrH2\_Inf  
 Public GFAdjQrH3\_Med  
 Public BrZeroQrH3\_Med  
 Public CKnownQrH3\_Med  
 Public GFAdjQrH4\_Med  
 Public BrZeroQrH4\_Med  
 Public CKnownQrH4\_Med  
 Public GFAdjQrH5\_Med  
 Public BrZeroQrH5\_Med  
 Public CKnownQrH5\_Med  
 Public Temp\_Amb  
 Public Temp\_Pan  
  
 Public Volt\_Presion\_Subbase  
 Public PGF\_Subbase\_A  
 Public PGF\_Subbase\_B  
 Public PGF\_Subbase\_C  
 Public Presion\_Subbase  
 Public COff  
 Public CReps\_2  
 Public ZMode\_2  
 Public CIndex\_2  
 Public CAvg\_2

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 132 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



Public Volt\_Presion\_Subrasante  
 Public PGF\_Subrasante\_A  
 Public PGF\_Subrasante\_B  
 Public PGF\_Subrasante\_C  
 Public Presion\_Subrasante  
 Public COff\_2  
 Public CReps\_3  
 Public ZMode\_3  
 Public CIndex\_3  
 Public CAvg\_3  
 Public GFRawQrH1\_Inf  
 Public GFRawQrH2\_Inf  
 Public GFRawQrH3\_Med  
 Public GFRawQrH4\_Med  
 Public GFRawQrH5\_Med

Units BattV=Volts  
 Units PTemp\_C=Deg C

Units Vr\_H1\_Inf=mV/V

Units BrZeroQrH1\_Inf=mV/V  
 Units BrZeroQrH2\_Inf=mV/V  
 Units BrZeroQrH3\_Med=mV/V  
 Units BrZeroQrH4\_Med=mV/V  
 Units BrZeroQrH5\_Med=mV/V

Units Temp\_Amb=Deg C  
 Units Temp\_Pan=Deg C

Units Volt\_Presion\_Subbase=mV  
 Units Volt\_Presion\_Subrasante=mV  
 Units Presion\_Subbase=kPa  
 Units Presion\_Subrasante=kPa  
 Units Strain\_H1\_Inf=microstrain  
 Units Strain\_H2\_Inf=microstrain  
 Units Strain\_H3\_Med=microstrain  
 Units Strain\_H4\_Med=microstrain  
 Units Strain\_H5\_Med=microstrain  
 Units Vr\_H2\_Inf=mV/V  
 Units Vr\_H3\_Med=mV/V  
 Units Vr\_H4\_Med=mV/V  
 Units Vr\_H5\_Med=mV/V

Public Calibrat(9)  
 Public TrCalib  
 Public contador  
 Public Trtables

'Define Data Tables

DataTable(Calib,TrCalib,1)  
 DataInterval(0,1,Sec,10)  
 Average(1,Vr\_H1\_Inf,FP2,False)  
 Average(1,Vr\_H2\_Inf,FP2,False)  
 Average(1,Vr\_H3\_Med,FP2,False)

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 133 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



```

Average(1,Vr_H4_Med,FP2,False)
Average(1,Vr_H5_Med,FP2,False)
Average(1,Volt_Presion_Subbase,FP2,False)
Average(1,Volt_Presion_Subrasante,FP2,False)
EndTable

```

```

DataTable(Temperatura,Trtables,-1)
DataInterval(0,10,Sec,10)
CardOut (0 ,-1 )
Average(1,Temp_Amb,FP2,False)
Average(1,Temp_Pan,FP2,False)
EndTable

```

```

DataTable(Presion,1,-1)
CardOut (0 ,-1 )
DataEvent(400,Trtables=1,Trtables=0,400)
Sample(1,Volt_Presion_Subbase,IEEEE4)
Sample(1,Volt_Presion_Subrasante,IEEEE4)
Sample (1,Presion_Subbase,FP2)
Sample (1,Presion_Subrasante,FP2)
EndTable

```

```

DataTable(StrainFullB,1,-1)
CardOut (0 ,-1 )
DataEvent(400,Trtables=1,Trtables=0,400)
Sample(1,Strain_H1_Inf,IEEEE4)
Sample(1,Strain_H2_Inf,IEEEE4)
Sample(1,Strain_H3_Med,IEEEE4)
Sample(1,Strain_H4_Med,IEEEE4)
Sample(1,Strain_H5_Med,IEEEE4)
Sample(1,Vr_H1_Inf,IEEEE4)
Sample(1,Vr_H2_Inf,IEEEE4)
Sample(1,Vr_H3_Med,IEEEE4)
Sample(1,Vr_H4_Med,IEEEE4)
Sample(1,Vr_H5_Med,IEEEE4)
EndTable

```

```

DataTable(StrainFullB_Temp,1,-1)
DataInterval(0,20,min,10)
Sample(1,Strain_H1_Inf,IEEEE4)
Sample(1,Strain_H5_Med,IEEEE4)
EndTable

```

```

DataTable (Mantenimiento,True,-1)
DataInterval (0,30,Min,10)
Minimum (1,HumInterna,FP2,False,False)
Average (9,CH200Data(),FP2,False)
Average (1,Nivel_m,FP2,False)
EndTable

```

```

'Calibration history table
DataTable(Calhist,NewFieldCal,12)
SampleFieldCal
EndTable

```

```

'Main Program
BeginProg

```

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 134 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



'Encender VOLT108 y comunicacion  
SW12 (SW12\_1,EstadoComunicacion)  
SW12 (SW12\_2,1 )

'Alimentacion sensor de humedad y retorno de cierre de puerta  
PortSet (C4,1 )

'Initialize calibration variables for  
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr\_H1\_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1  
CIndexQrH1\_Inf=1 : CAvgQrH1\_Inf=1 : CRepsQrH1\_Inf=1 : GFRawQrH1\_Inf=2 : GFAdjQrH1\_Inf=GFRawQrH1\_Inf  
CIndexQrH2\_Inf=1 : CAvgQrH2\_Inf=1 : CRepsQrH2\_Inf=1 : GFRawQrH2\_Inf=2 : GFAdjQrH2\_Inf=GFRawQrH2\_Inf  
CIndexQrH3\_Med=1 : CAvgQrH3\_Med=1 : CRepsQrH3\_Med=1 : GFRawQrH3\_Med=2 : GFAdjQrH3\_Med=GFRawQrH3\_Med  
CIndexQrH4\_Med=1 : CAvgQrH4\_Med=1 : CRepsQrH4\_Med=1 : GFRawQrH4\_Med=2 : GFAdjQrH4\_Med=GFRawQrH4\_Med  
CIndexQrH5\_Med=1 : CAvgQrH5\_Med=1 : CRepsQrH5\_Med=1 : GFRawQrH5\_Med=2 : GFAdjQrH5\_Med=GFRawQrH5\_Med

'Initialize calibration variables for  
'Generic Differential Voltage measurement 'Volt\_Presion\_Subbase' on VOLT108 with CPI address 1  
CIndex\_2=1 : CAvg\_2=1 : CReps\_2=1 : Coff=0  
'Initialize calibration variables for  
'Generic Differential Voltage measurement 'Volt\_Presion\_Subrasante' on VOLT108 with CPI address 1  
CIndex\_3=1 : CAvg\_3=1 : CReps\_3=1 : Coff\_2=0

'Load the most recent calibration values from the CalHist table  
FCLoaded=LoadFieldCal(True)

PGF\_Subbase\_A = 0.0278 : PGF\_Subbase\_B = 79.70 : PGF\_Subbase\_C = 0  
PGF\_Subrasante\_A = -0.0464 : PGF\_Subrasante\_B = 80.19 : PGF\_Subrasante\_C = 0

Main Scan

Scan(25,mSec,150,0)

'Alimentar celdas de presion 12v  
CDM\_SW12 (VOLT108,1,1 ,1 )

RealTime (tiempo())

'Contador para controlar la tabla de calibracin  
contador=contador+1  
If contador>700 OR contador<500 Then  
TrCalib=0  
'Extraer Zero de la tabla de calibracion  
GetRecord (Calibrat(),Calib,1)  
BrZeroQrH1\_Inf=Calibrat (1)  
BrZeroQrH2\_Inf=Calibrat (2)  
BrZeroQrH3\_Med=Calibrat (3)  
BrZeroQrH4\_Med = Calibrat (4)  
BrZeroQrH5\_Med = Calibrat (5)  
'Codigo de Campbell  
'Coff=-Calibrat (6)  
'Coff\_2=-Calibrat (7)  
Else  
TrCalib=1  
EndIf



```
'Activador grabar en tablas
If Presion_Subbase > Umbral_Tr OR Presion_Subrasante > Umbral_Tr Then
  Trtables=1
Else
  Trtables=0
EndIf
```

```
'Default CR5 Datalogger Battery Voltage measurement 'BattV'
Battery(BattV)
'Default CR6 Datalogger Wiring Panel Temperature measurement 'PTemp_C'
PanelTemp(PTemp_C,15000)
```

```
"""""""""" Medicion de las 5 galgas """"""""""
'Galga H1_Inf
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr_H1_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1
CDM_BrFull(VOLT108,1,Vr_H1_Inf,1,mV200,1,X1,2,2500,0,0,100,30000,1,0)
'Calculated strain result 'Strain_H1_Inf()' for
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr_H1_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1
StrainCalc(Strain_H1_Inf,1,Vr_H1_Inf,BrZeroQrH1_Inf,4,GFAdjQrH1_Inf,0)
'Full bridge strain shunt calibration for
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr_H1_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1
```

```
FieldCalStrain(13,Strain_H1_Inf,1,CRepsQrH1_Inf,0,QBSSMode,CKnownQrH1_Inf,CIndexQrH1_Inf,CAvgQrH1_Inf,GFR
awQrH1_Inf,0)
'Zeroing calibration for
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr_H1_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1
```

```
FieldCalStrain(10,Vr_H1_Inf,CRepsQrH1_Inf,0,BrZeroQrH1_Inf,ZMode,0,CIndexQrH1_Inf,CAvgQrH1_Inf,0,Strain_H1_Inf)
```

"Galga H2\_Inf

```
BrFull (Vr_H2_Inf,1,mv200,U9,U8,1,2500,0,0,100,30000,1,0,0)
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr_H2_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1
CDM_BrFull(VOLT108,1,Vr_H2_Inf,1,mV200,1,X1,2,2500,0,0,100,30000,1,0)
'Calculated strain result 'Strain_H1_Inf()' for
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr_H2_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1
StrainCalc(Strain_H2_Inf,1,Vr_H2_Inf,BrZeroQrH2_Inf,4,GFAdjQrH2_Inf,0)
'Full bridge strain shunt calibration for
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr_H2_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1
```

```
FieldCalStrain(43,Strain_H2_Inf,1,CRepsQrH2_Inf,0,QBSSMode,CKnownQrH2_Inf,CIndexQrH2_Inf,CAvgQrH2_Inf,GFR
awQrH2_Inf,0)
'Zeroing calibration for
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr_H2_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1
```

```
FieldCalStrain(10,Vr_H2_Inf,CRepsQrH2_Inf,0,BrZeroQrH2_Inf,ZMode,0,CIndexQrH2_Inf,CAvgQrH2_Inf,0,Strain_H2_Inf)
```

"Galga H3\_Med

```
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr_H1_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1
'CDM_BrFull(VOLT108,1,Vr_H3_Med,1,mV200,3,X1,1,2500,0,0,100,30000,1,0)
'Calculated strain result 'Strain_H1_Inf()' for
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr_H1_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1
StrainCalc(Strain_H3_Med,1,Vr_H3_Med,BrZeroQrH3_Med,6,GFAdjQrH3_Med,0)
```

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 136 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



'Full bridge strain shunt calibration for  
'Quarter Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr\_H1\_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1

FieldCalStrain(13,Strain\_H3\_Med,1,CRepsQrH3\_Med,0,QBSSMode,CKnownQrH3\_Med,CIndexQrH3\_Med,CAvgQrH3\_Med,GFRawQrH3\_Med,0)

'Zeroing calibration for  
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr\_H1\_Inf()' on VOLT108 with CPI address 1

FieldCalStrain(10,Vr\_H3\_Med,CRepsQrH3\_Med,0,BrZeroQrH3\_Med,ZMode,0,CIndexQrH3\_Med,CAvgQrH3\_Med,0,Strain\_H3\_Med)

"Galga H4\_Med  
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr\_H4\_Med()' on VOLT108 with CPI address 1  
'CDM\_BrFull(VOLT108,1,Vr\_H4\_Med,1,mV200,4,X2,1,2500,0,0,100,30000,1,0)  
'Calculated strain result 'Strain\_H1\_Inf()' for  
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr\_H4\_Med()' on VOLT108 with CPI address 1  
StrainCalc(Strain\_H4\_Med,1,Vr\_H4\_Med,BrZeroQrH4\_Med,4,GFAdjQrH4\_Med,0)  
'Full bridge strain shunt calibration for  
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr\_H4\_Med()' on VOLT108 with CPI address 1

FieldCalStrain(13,Strain\_H4\_Med,1,CRepsQrH4\_Med,0,QBSSMode,CKnownQrH4\_Med,CIndexQrH4\_Med,CAvgQrH4\_Med,GFRawQrH4\_Med,0)

'Zeroing calibration for  
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr\_H4\_Med()' on VOLT108 with CPI address 1

FieldCalStrain(10,Vr\_H4\_Med,CRepsQrH4\_Med,0,BrZeroQrH4\_Med,ZMode,0,CIndexQrH4\_Med,CAvgQrH4\_Med,0,Strain\_H4\_Med)

"Galga H5\_Med  
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr\_H5\_Med()' on VOLT108 with CPI address 1  
CDM\_BrFull(VOLT108,1,Vr\_H5\_Med,1,mV200,5,X2,1,2500,0,0,100,30000,1,0)  
'Calculated strain result 'Strain\_H1\_Inf()' for  
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr\_H5\_Med()' on VOLT108 with CPI address 1  
StrainCalc(Strain\_H5\_Med,1,Vr\_H5\_Med,BrZeroQrH5\_Med,4,GFAdjQrH5\_Med,0)  
'Full bridge strain shunt calibration for  
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr\_H5\_Med()' on VOLT108 with CPI address 1

FieldCalStrain(13,Strain\_H5\_Med,1,CRepsQrH5\_Med,0,QBSSMode,CKnownQrH5\_Med,CIndexQrH5\_Med,CAvgQrH5\_Med,GFRawQrH5\_Med,0)

'Zeroing calibration for  
'Full Bridge Strain, 4-wire measurement 'Vr\_H5\_Med()' on VOLT108 with CPI address 1

FieldCalStrain(10,Vr\_H5\_Med,CRepsQrH5\_Med,0,BrZeroQrH5\_Med,ZMode,0,CIndexQrH5\_Med,CAvgQrH5\_Med,0,Strain\_H5\_Med)

\*\*\*\*\* Medicion de celdas de presion \*\*\*\*\*  
'Generic Differential Voltage measurements 'Volt\_Presion\_Subbase' on VOLT108 with CPI address 1  
CDM\_VoltDiff(VOLT108,1,Volt\_Presion\_Subbase,1,mV5000,8,0,100,30000,1,0)  
'Zeroing calibration for  
'Generic Differential Voltage measurement 'Volt\_Presion\_Subbase' on VOLT108 with CPI address 1  
'FieldCal(0,Volt\_Presion\_Subbase,CReps\_2,0,COff,ZMode\_2,0,CIndex\_2,CAvg\_2)

'Generic Differential Voltage measurements 'Volt\_Presion\_Subrasante' on VOLT108 with CPI address 1  
CDM\_VoltDiff(VOLT108,1,Volt\_Presion\_Subrasante,1,mV5000,7,0,100,30000,1,0)  
'Zeroing calibration for  
'Generic Differential Voltage measurement 'Volt\_Presion\_Subrasante' on VOLT108 with CPI address 1  
'FieldCal(0,Volt\_Presion\_Subrasante,CReps\_3,0,COff\_2,ZMode\_3,0,CIndex\_3,CAvg\_3)

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 137 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



```

Presion_Subbase=PGF_Subbase_A*((Volt_Presion_Subbase-
Calibrat(6))/1000)^2+PGF_Subbase_B*((Volt_Presion_Subbase-Calibrat(6))/1000)+PGF_Subbase_C
Presion_Subrasante=PGF_Subrasante_A*((Volt_Presion_Subrasante-
Calibrat(7))/1000)^2+PGF_Subrasante_B*((Volt_Presion_Subrasante-Calibrat(7))/1000)+PGF_Subrasante_C

```

.....

```

"Medicion de termocuplas"
"Type K Thermocouple measurements 'Temp_Amb' on CR6
TCDiff(Temp_Amb,1,mv200C,U3,TypeK,PTemp_C,0,100,30000,1,0)
"Type K Thermocouple measurements 'Temp_Pan' on CR6
TCDiff(Temp_Pan,1,mv200C,U1,TypeK,PTemp_C,0,100,30000,1,0)

```

```

"Control de disparo a partir de cierto umbral para todas las galgas"
If (Strain_H5_Med>UmbraldeInicio OR Strain_H4_Med>UmbraldeInicio OR Strain_H3_Med>UmbraldeInicio OR
Strain_H2_Inf>UmbraldeInicio OR Strain_H1_Inf>UmbraldeInicio) AND ((hora >= InicioGrabado) AND (hora <
FinalGrabado)) Then
  TriggerDataEvent = true
  ElseIf Strain_H5_Med<UmbraldeFin OR Strain_H4_Med<UmbraldeFin OR Strain_H3_Med<UmbraldeFin OR
Strain_H2_Inf<UmbraldeFin OR Strain_H1_Inf<UmbraldeFin Then
    TriggerDataEvent = false
  EndIf

```

```

'Para control de trigger de la camara
PortSet(C1,TriggerDataEvent)

```

```

"Se obtiene el estado del sensor de aperura del armario"
PortGet (PuertaCerrada,C2)
PuertaCerrada = NOT(PuertaCerrada)

```

```

"Control de energia del modem celular"
If TimeIsBetween (inicioComunicacion*60,finalComunicacion *60,1440,min) AND ( BattV > MinimoBateriaComm) Then
  EstadoComunicacion = true
Else
  EstadoComunicacion = false
EndIf
SW12 (SW12_1,EstadoComunicacion)
IPNetPower (1,EstadoComunicacion)
IPNetPower (4,EstadoComunicacion)

```

```

CallTable Temperatura
CallTable Presion
CallTable StrainFullB
CallTable Calhist
CallTable Calib
CallTable StrainFullB_Temp
NextScan
SlowSequence
Scan (1,min,3,0)
SDI12Recorder(CH200Data(),C3,"1","MC!",1,0,-1)
  'CS450/CS451/CS455/CS456 Pressure Transducer measurements 'Nivel_m' and 'Temp_C'
  SDI12Recorder(Nivel_m,C3,"0","M1!",1,0,-1)
  Nivel_m=Nivel_m*0.70307
VoltSe (HumInterna,1,mV5000,U12,True,0,15000,0,1,0)

```

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 138 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

CallTable Mantenimiento  
NextScan  
EndSequence  
EndProg

Informe LM-PI-UIIT-116-2020-R1	Fecha de emisión: Agosto, 2020	Página 139 de 140
--------------------------------	--------------------------------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr  
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.  
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.





**Anexo C: Pesos máximos de vehículos de carga**

**Peso máximo por eje según tipo de vehículo de carga, según decreto 31363**

Tipo de Camión	Peso máximo por eje (toneladas)			Peso máximo total (toneladas)
	Grupo de ejes (tipo de eje)			
	1er	2do	3er	
C2+	6 (Simple)	6 (Simple)		6
C2	6 (Simple)	10 (Simple dual)		16
C3	6 (Simple)	16,5 (Tándem)		22,5
C4	6 (Simple)	23 (Tridem)		29
	13 (Tándem)	16,5 (Tándem)		29,5
T3-S2	6 (Simple)	16,5 (Tándem)	16,5 (Tándem)	39
T3-S3	6 (Simple)	16,5 (Tándem)	23 (Tridem)	45,5

Fuente: MOPT, 2003.