



CONTENIDOS

01



INTRODUCCIÓN

MARCO
CONCEPTUAL



02

03



DISEÑO E
IMPLEMENTACIÓN

PRUEBAS Y
RESULTADOS



04

05



CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES



Objetivos

Objetivo General

Analizar estrategias de transferencias de calibración entre equipos comerciales certificados y prototipos de monitorización de variables medioambientales

Objetivo 01

Identificar, a través de la investigación en la literatura, estrategias de calibración y transferencia de calibración apropiadas para estaciones de monitorización medioambiental.

Objetivo 02

Desarrollar dos prototipos para la medición de temperatura, CO y radiación UV haciendo uso de matrices de sensores.

Objetivo 03

Efectuar la calibración de los prototipos gemelos utilizando equipos comerciales certificados y aplicar las estrategias de transferencia desarrolladas del prototipo calibrado al prototipo no calibrado, con el fin de llevar a cabo una comparación exhaustiva entre los resultados.

Objetivo 04

Analizar el procedimiento y determinar la estrategia de transferencia de calibración más efectiva para los sistemas de monitorización medioambiental.

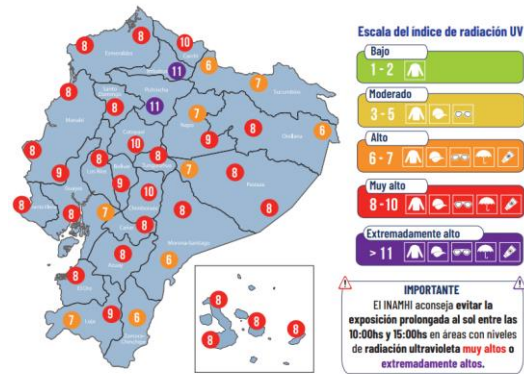


Introducción

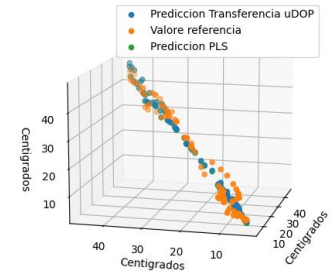
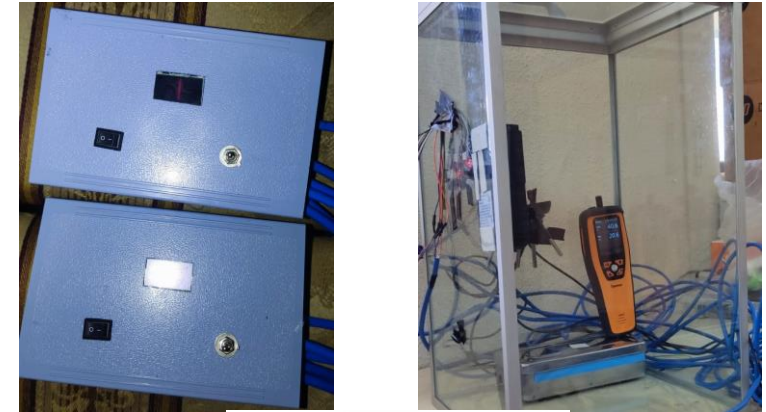
Antecedentes



Justificación e Importancia

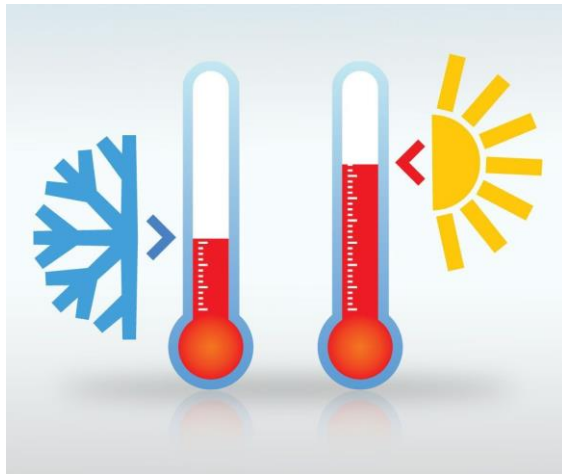


Alcance



MARCO CONCEPTUAL

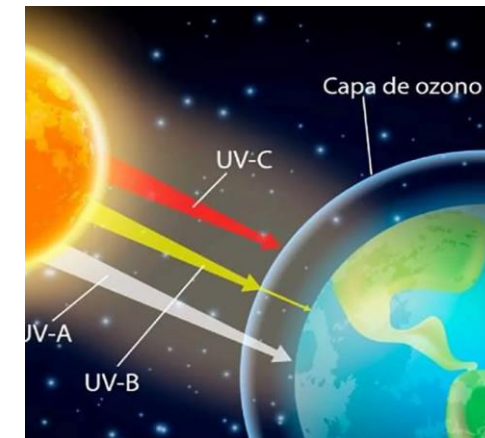
Temperatura



Monóxido de Carbono



Radiación UV

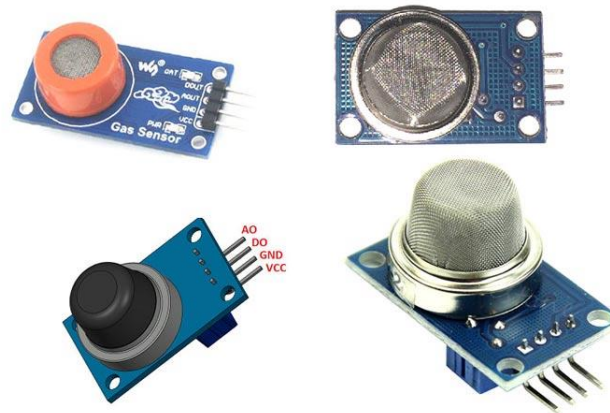


MARCO CONCEPTUAL

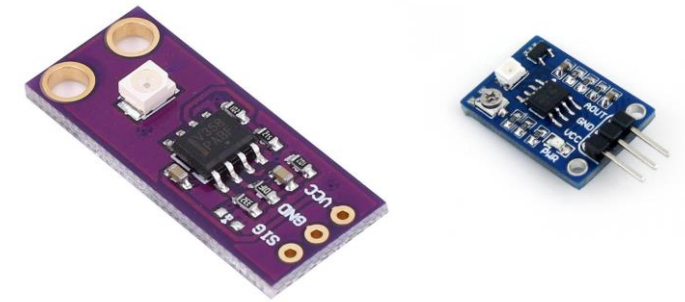
Sensores Temperatura



Sensores de Concentración Gas

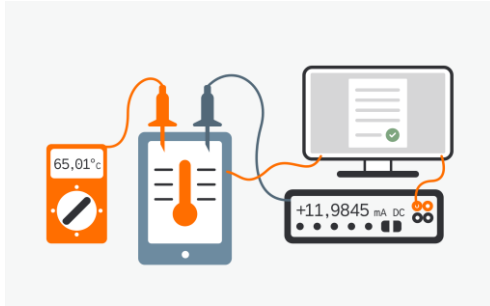


Sensores Radiación UV

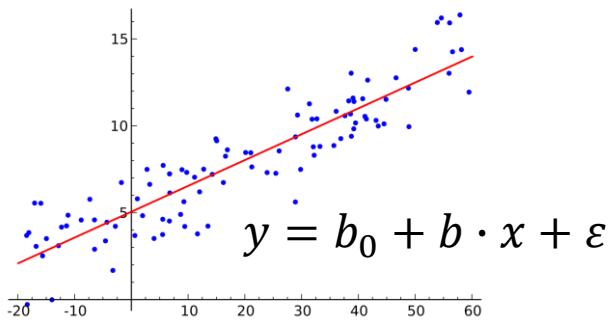


MARCO CONCEPTUAL

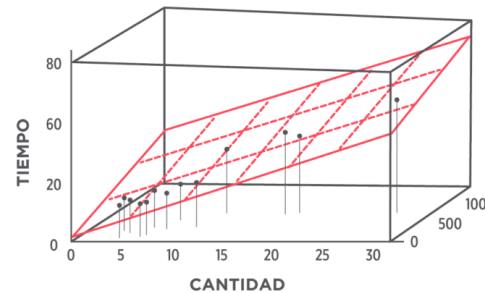
Calibración de sensores



Calibración univariable lineal



Regresión Lineal Múltiple (MLR)



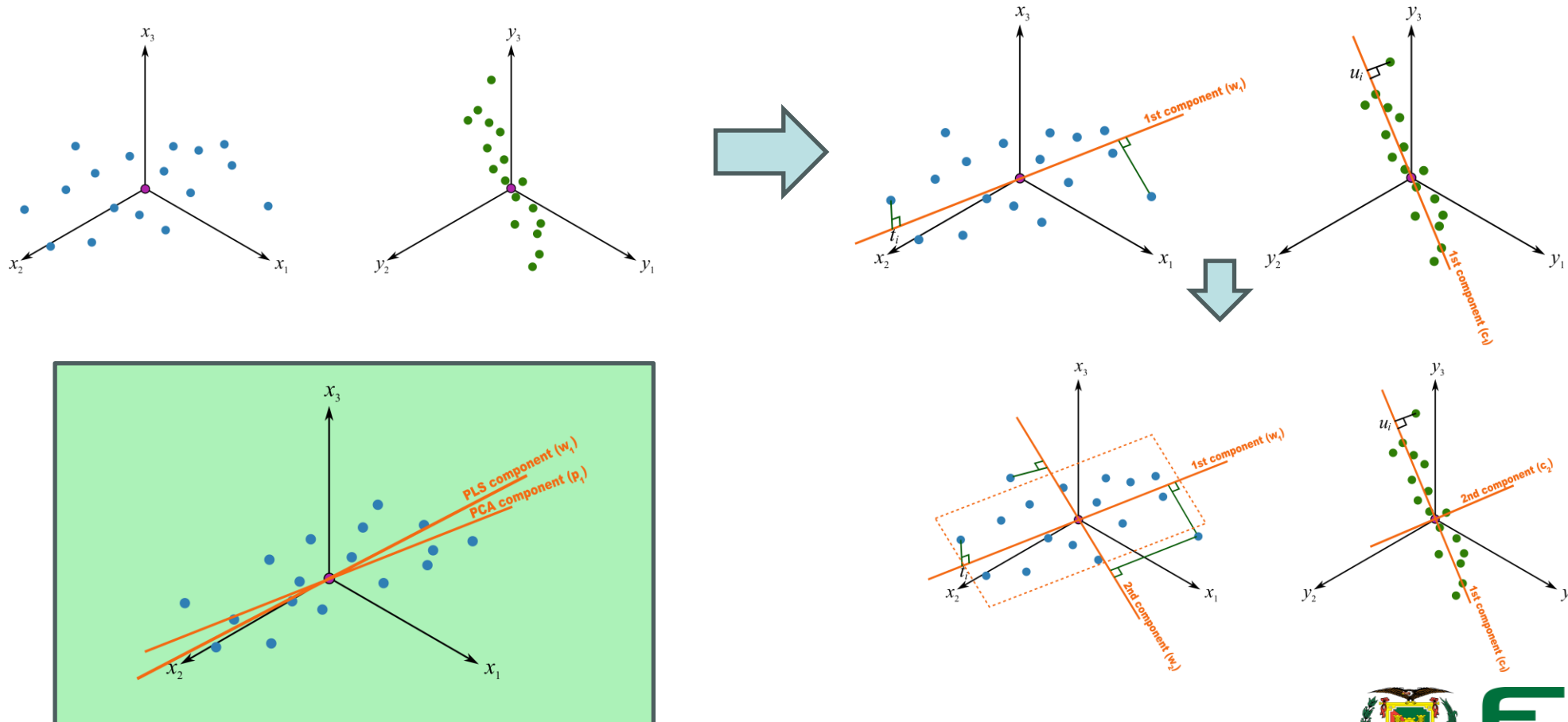
$$y = Xb + \epsilon$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix} \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \dots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$



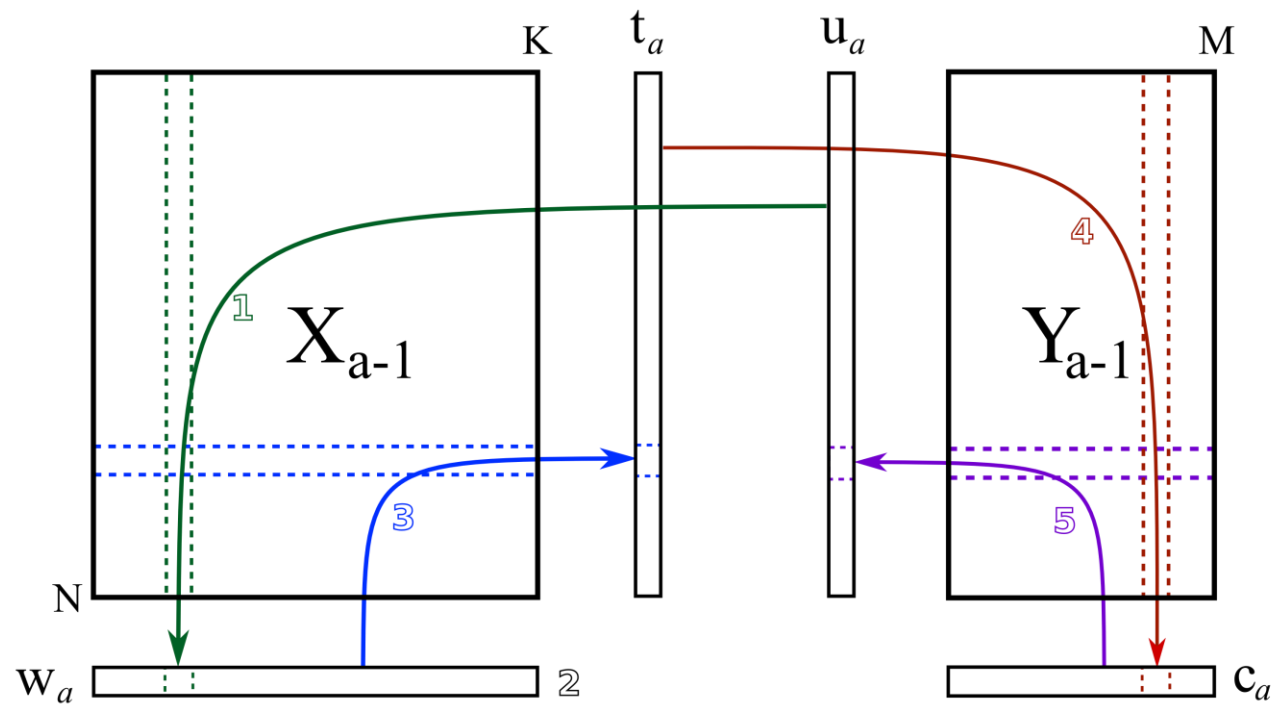
MARCO CONCEPTUAL

Partial Least Squares Regression



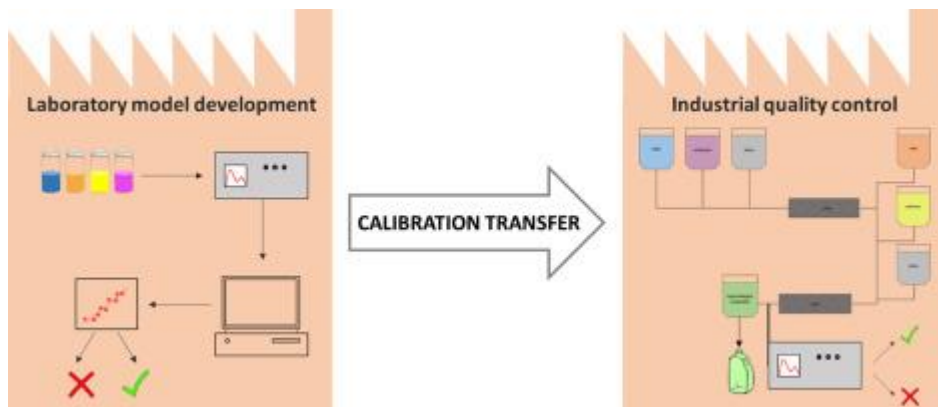
MARCO CONCEPTUAL

Partial Least Squares Regression

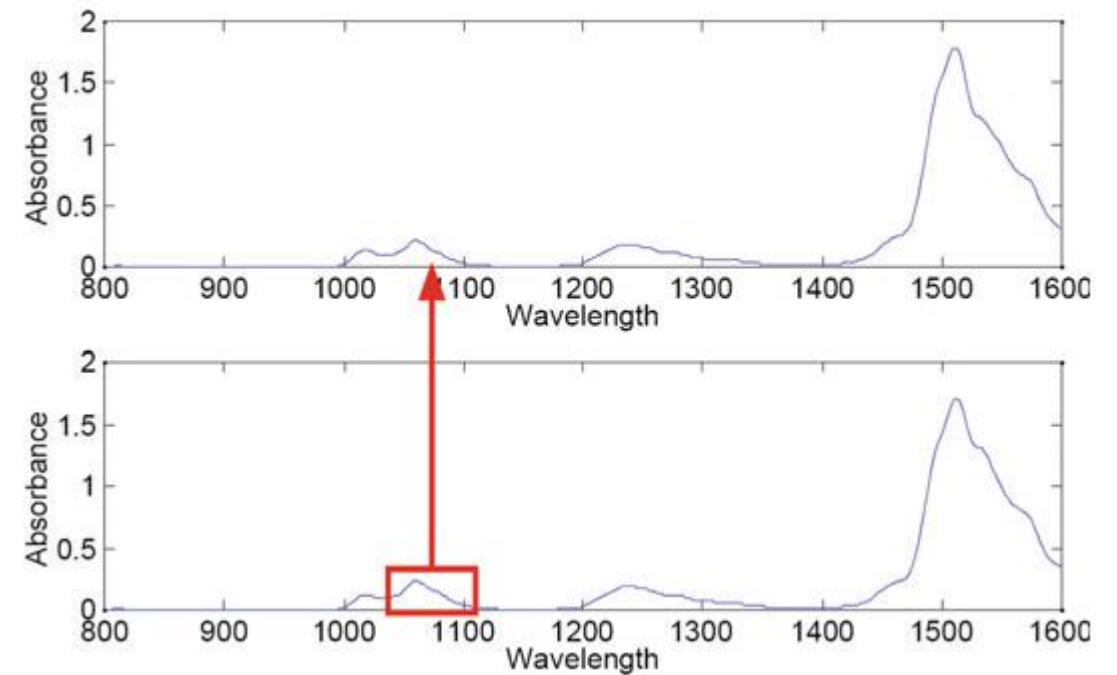


MARCO CONCEPTUAL

Transferencia de calibración

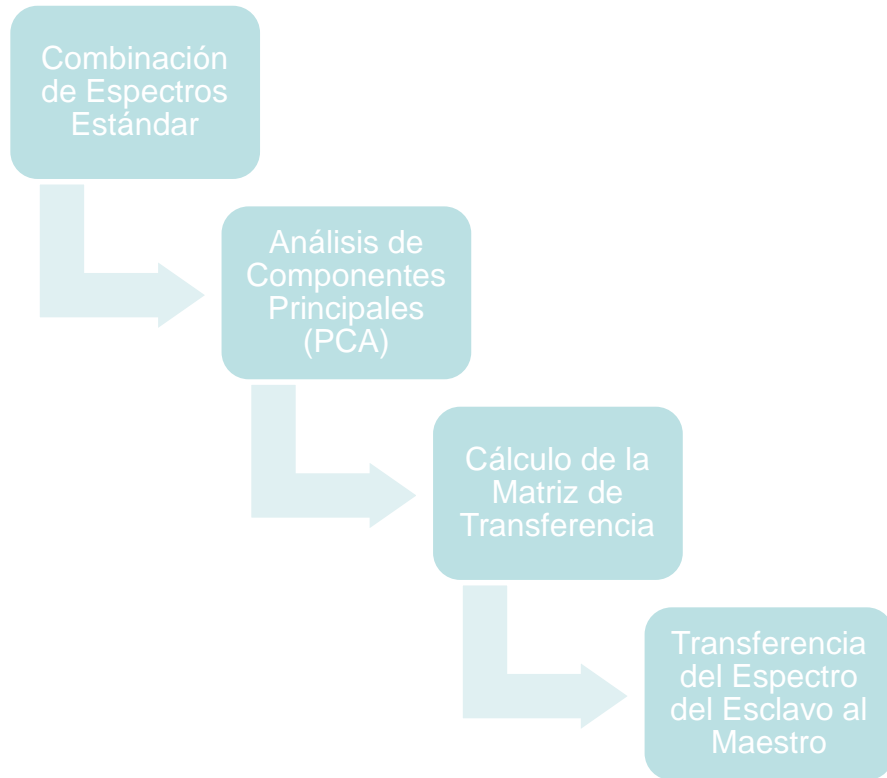


Partial Least Squares Regression

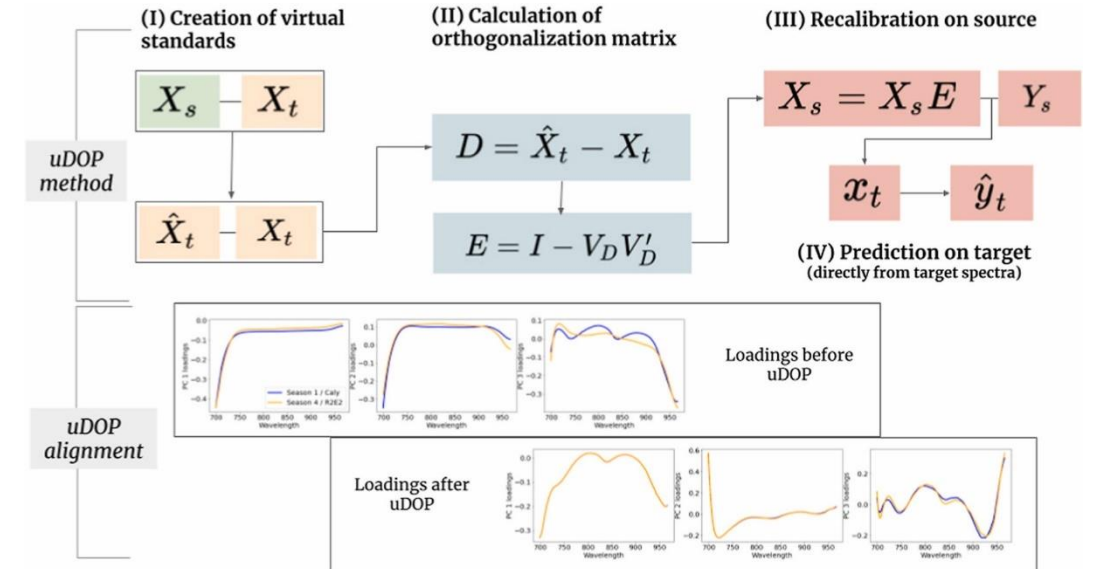


MARCO CONCEPTUAL

Spectral Space Transformation (SST)



Unsupervised Dynamic Orthogonal Projection (uDOP)

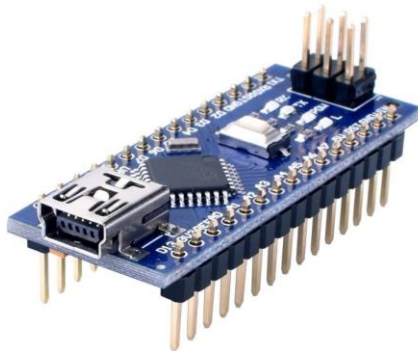


Diseño e Implementación

Rango de medición ambiental

Variable	Rango
Temperatura	26°C a 6°C
Radiación UV	0 a 11 índice radiación UV
Monóxido de Carbono	20 a 1000 PPM

Procesador

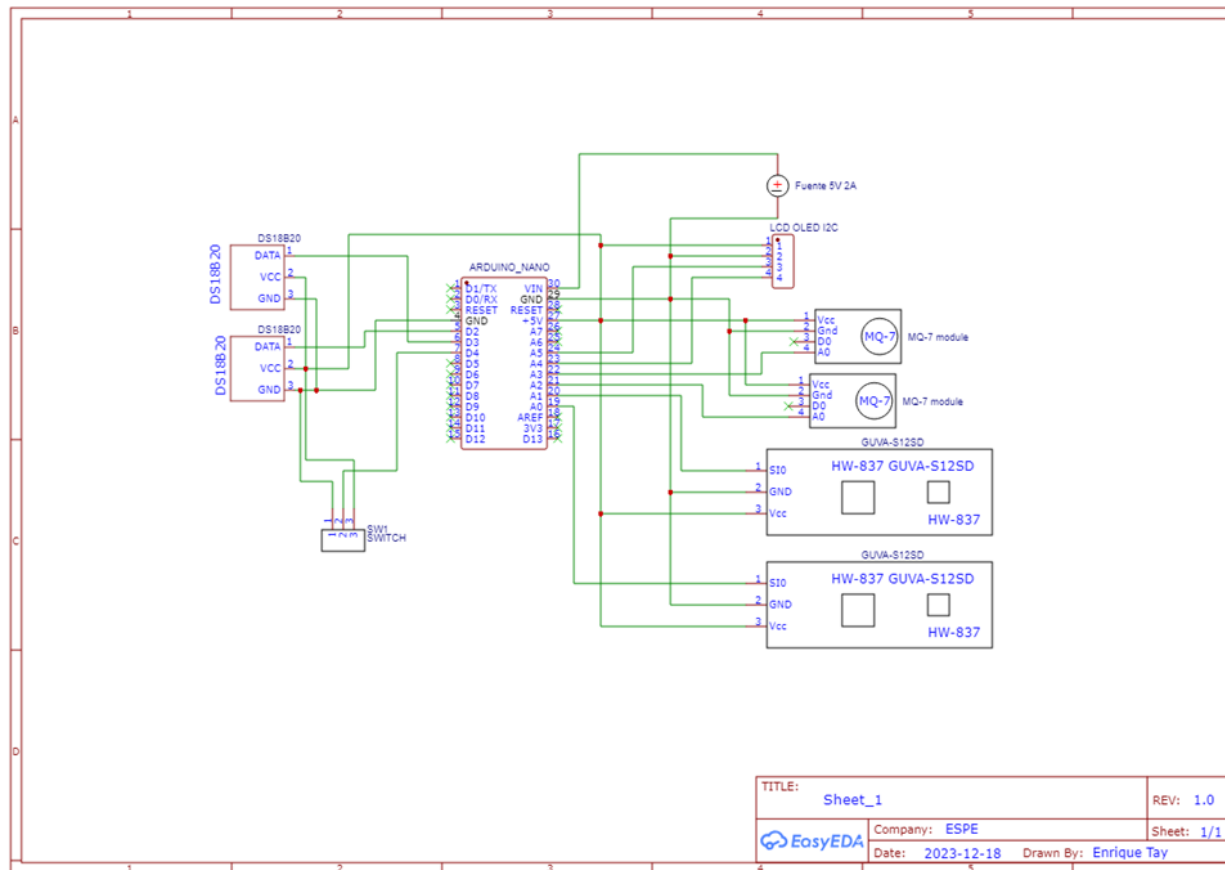


Selección de Sensores



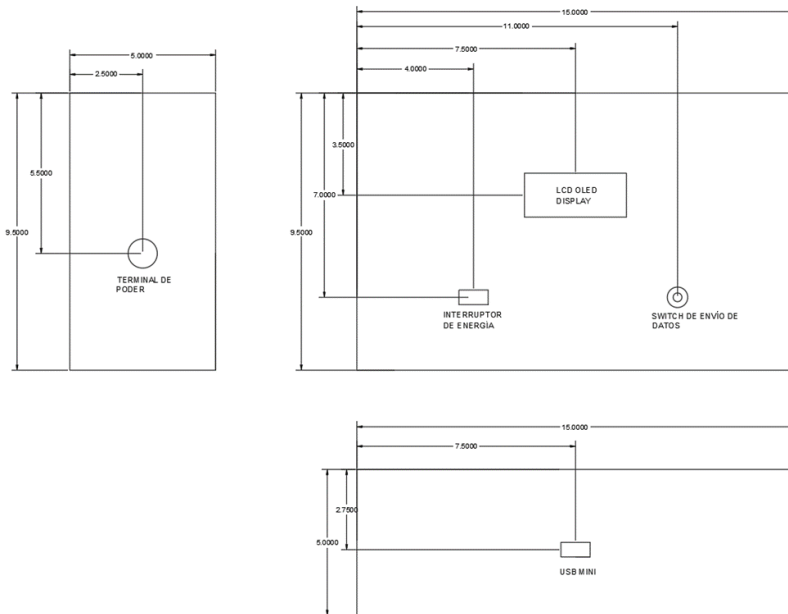
Diseño e Implementación

Diseño de Placa



Diseño e Implementación

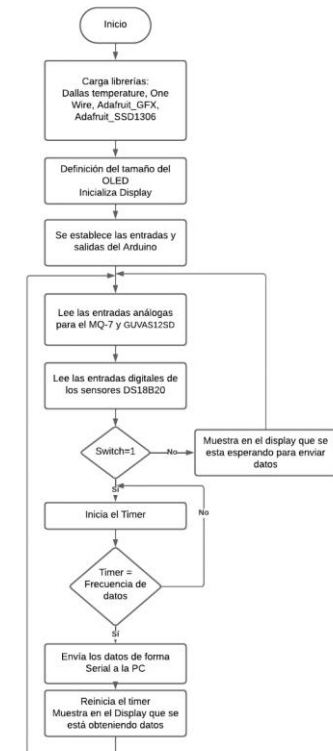
Dimensiones encubrimiento



Implementación



Software



Diseño e Implementación

Equipos de Referencia

M2000 Series Air Quality Monitor



CHNADKS - Detector de gas

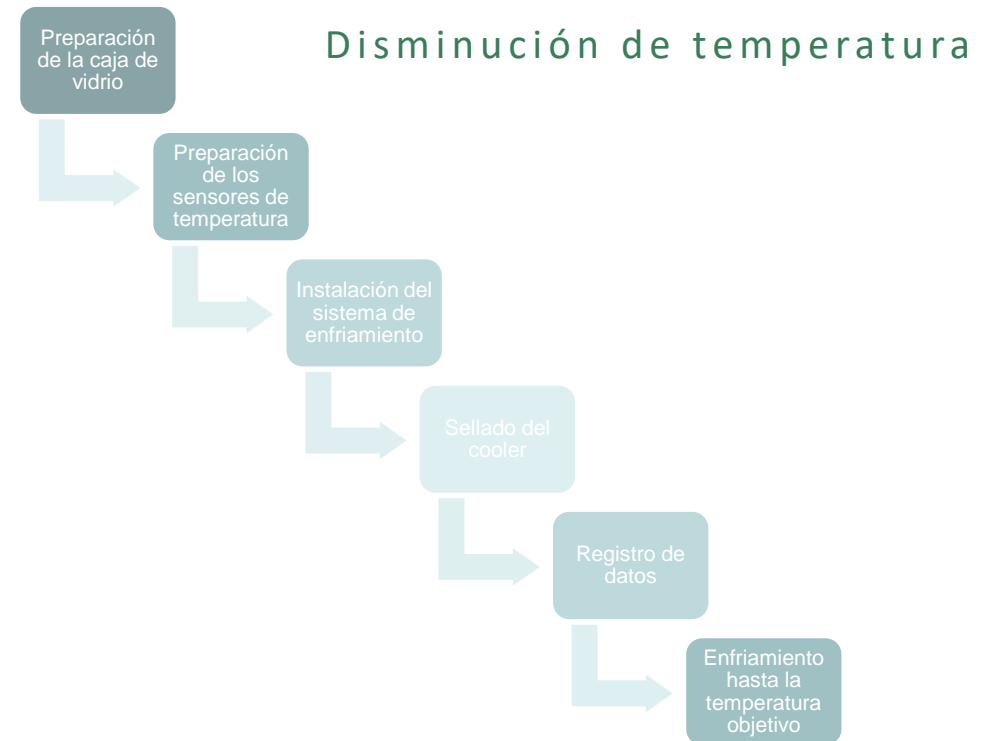
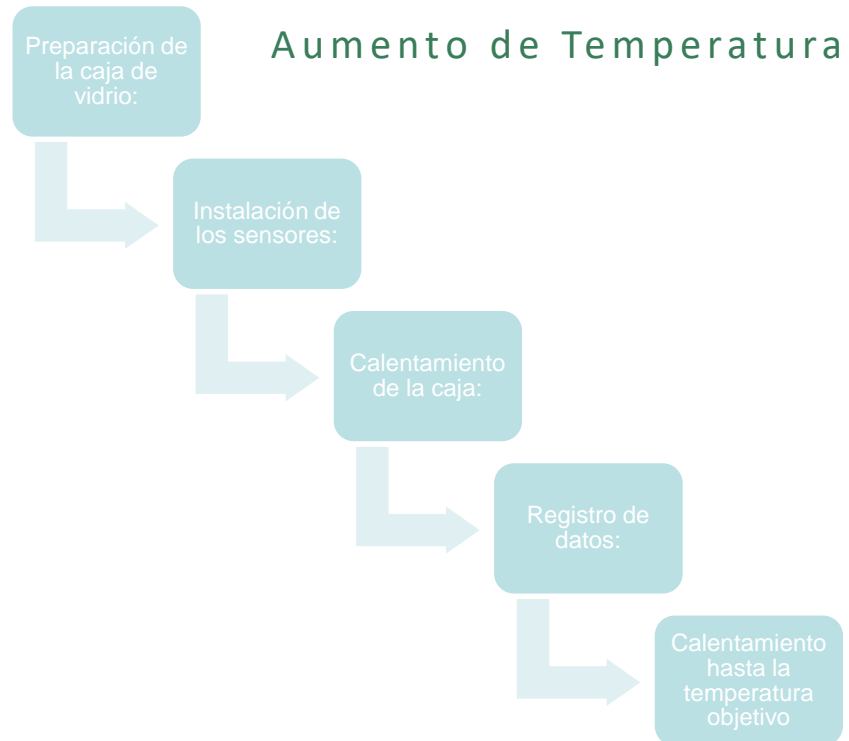


SOLMÁFORO



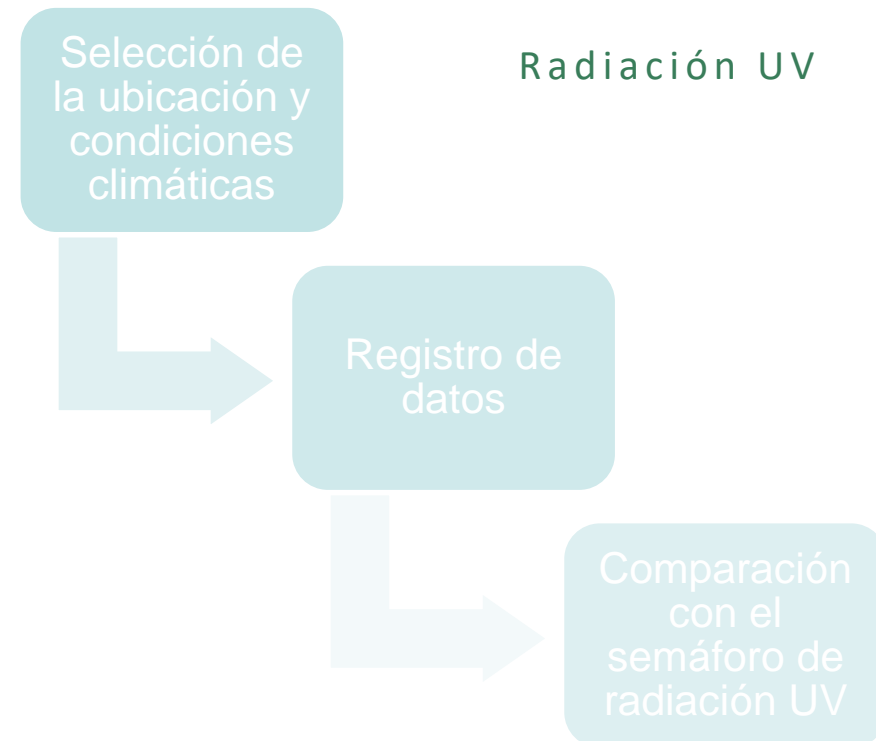
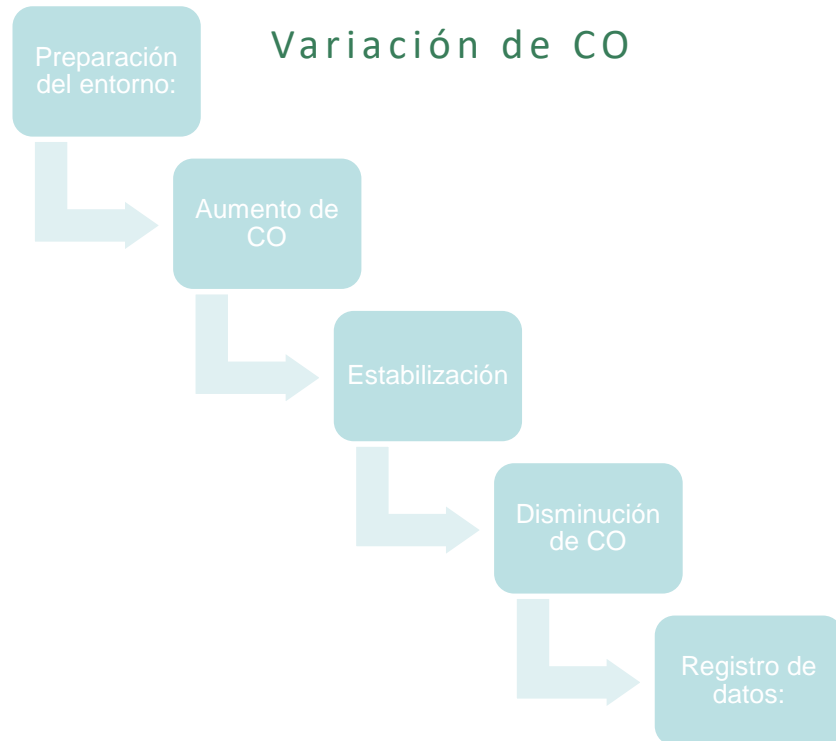
Diseño e Implementación

Protocolo de pruebas



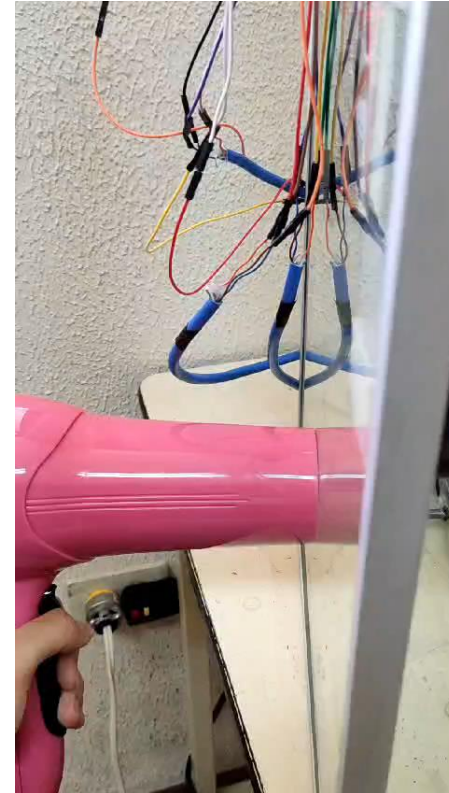
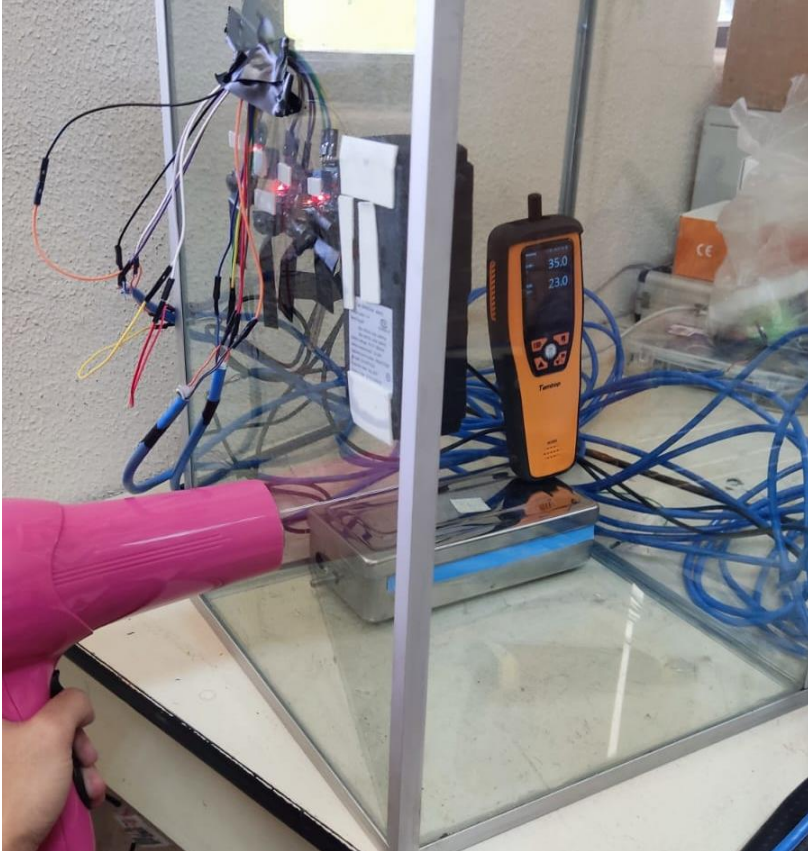
Diseño e Implementación

Protocolo de pruebas



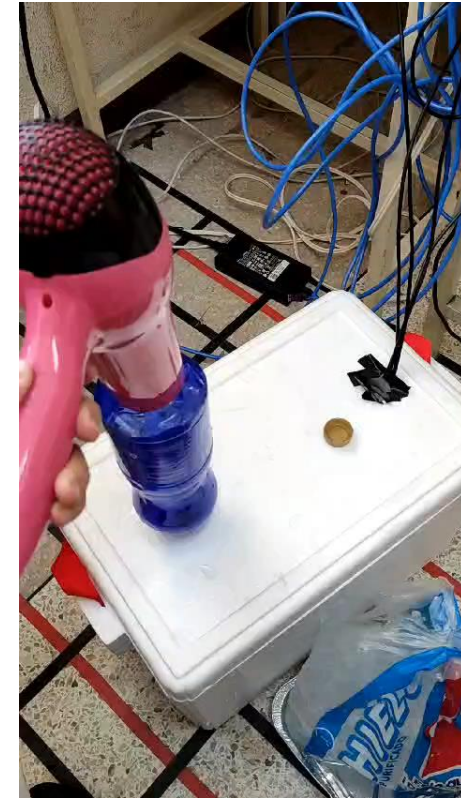
PRUEBAS Y RESULTADOS

Aumento Temperatura



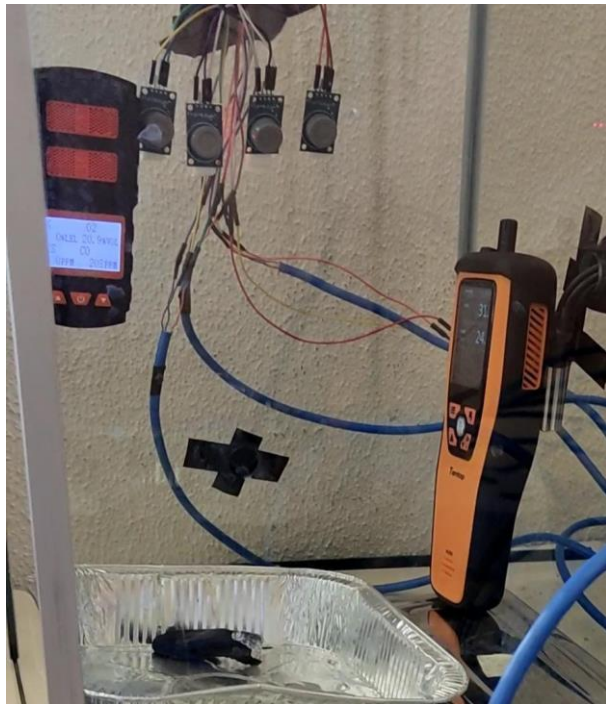
PRUEBAS Y RESULTADOS

Disminución Temperatura



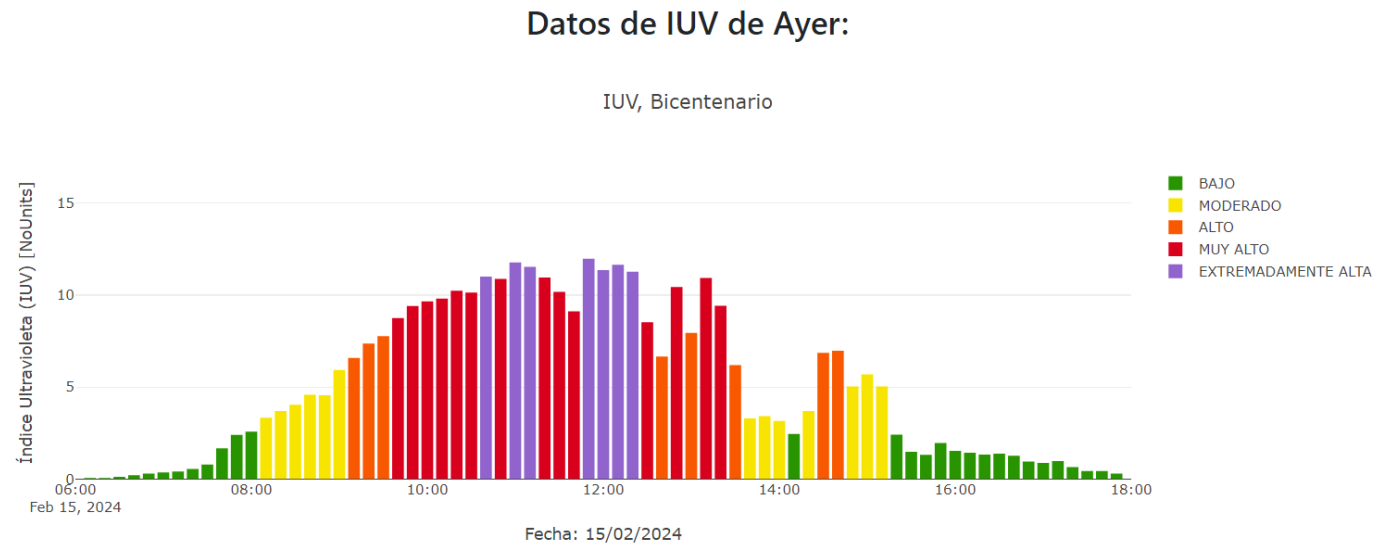
PRUEBAS Y RESULTADOS

Variación CO



PRUEBAS Y RESULTADOS

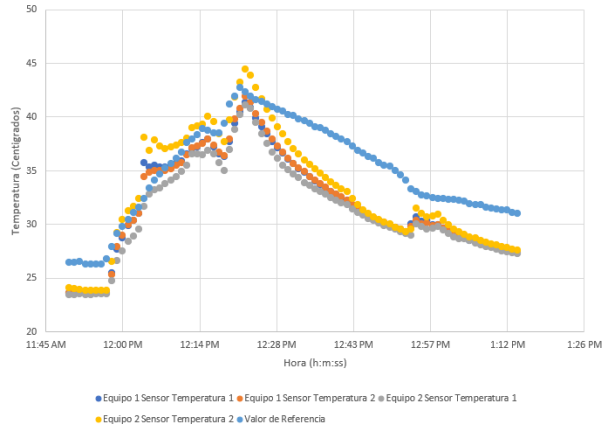
Radiación Ultravioleta



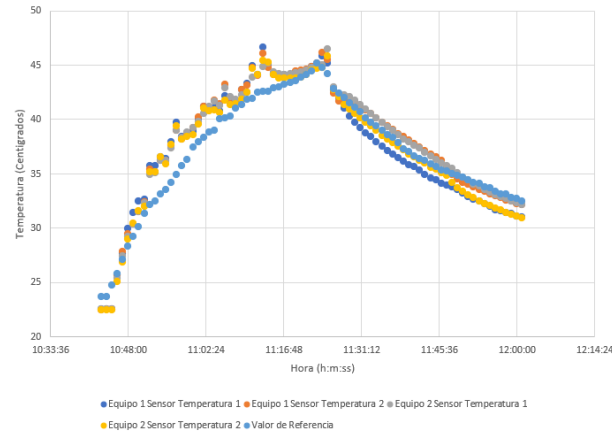
PRUEBAS Y RESULTADOS

Temperatura

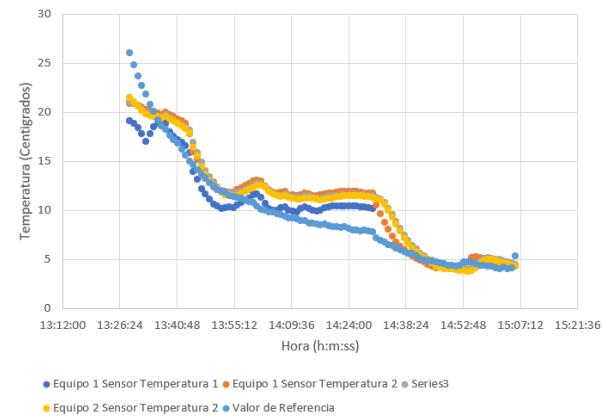
Resultados de la Adquisición de Datos No. 1 de Aumento de Temperatura



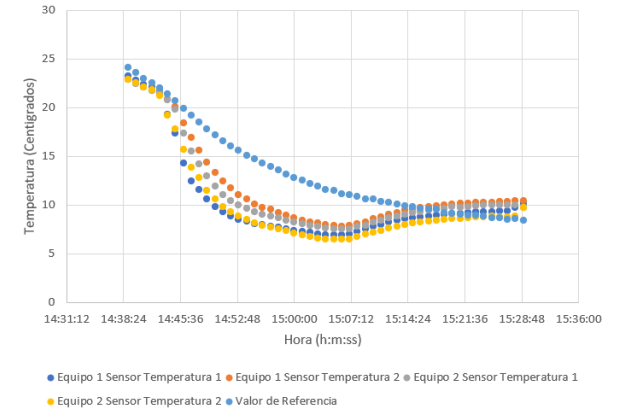
Resultados de la Adquisición de Datos No. 2 de Aumento de Temperatura



Resultados de la Adquisición de Datos No. 1 de Disminución de Temperatura



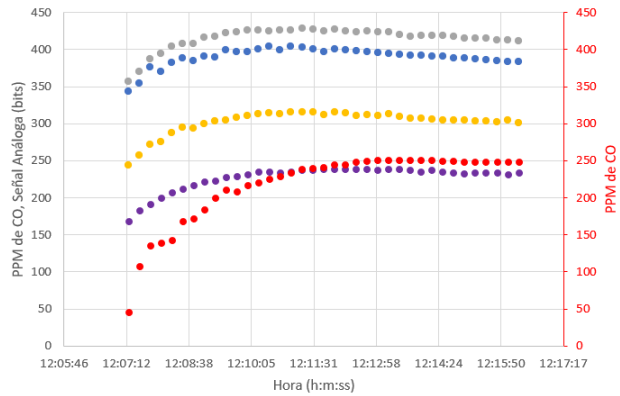
Resultados de la Adquisición de Datos No. 2 de Disminución de Temperatura



PRUEBAS Y RESULTADOS

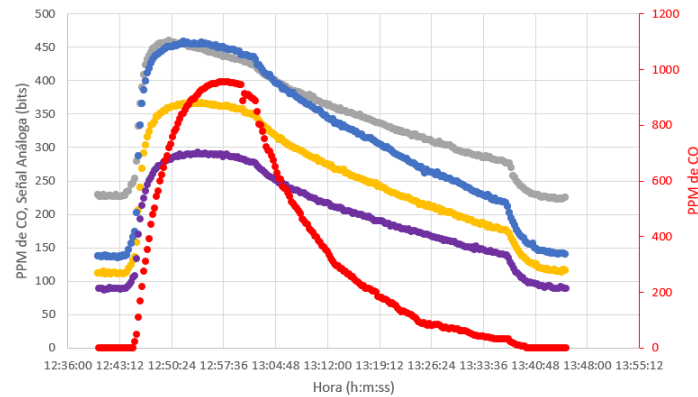
Monóxido de Carbono

Resultados de la Adquisición de Datos No. 1 de CO



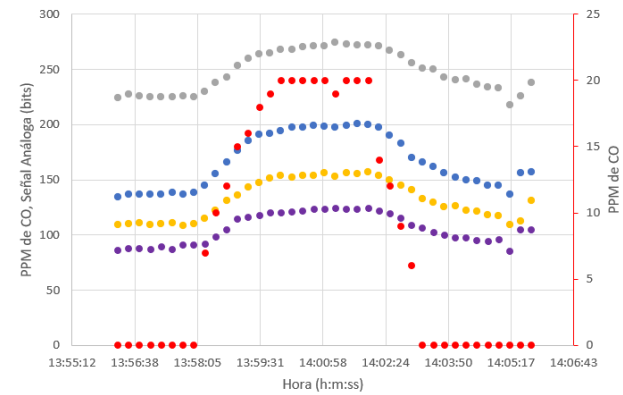
● Equipo 1 Sensor de CO 1 ● Equipo 1 Sensor de CO 2 ● Equipo 2 Sensor de CO 1
● Equipo 2 Sensor de CO 2 ● Valor de referencia

Resultados de la Adquisición de Datos No. 2 de CO



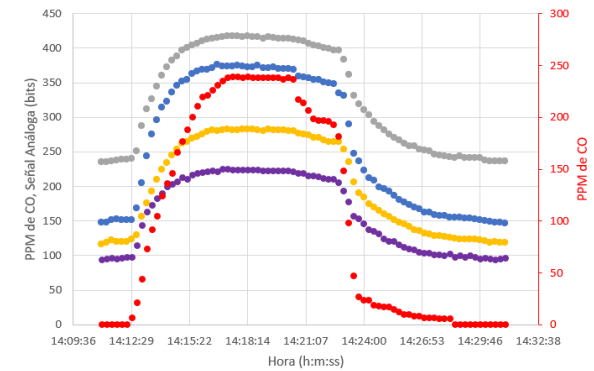
● Equipo 2 Sensor de CO 2 ● Equipo 2 Sensor de CO 1 ● Equipo 1 Sensor de CO 1
● Equipo 1 Sensor de CO 2 ● Valor de Referencia

Resultados de la Adquisición de Datos No.3 de CO



● Equipo 2 Sensor de CO 2 ● Equipo 2 Sensor de CO 1 ● Equipo 1 Sensor de CO 1
● Equipo 1 Sensor de CO 2 ● Valor de Referencia

Resultados de la Adquisición de Datos No.4 de CO



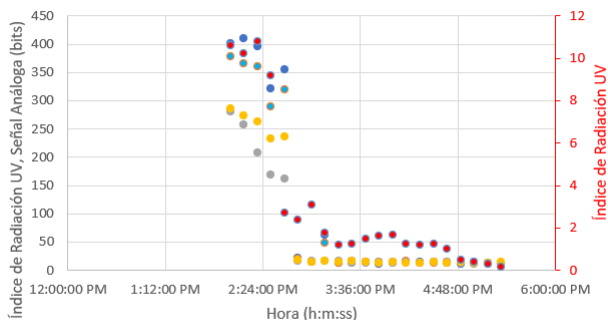
● Equipo 2 Sensor de CO 2 ● Equipo 2 Sensor de CO 1 ● Equipo 1 Sensor de CO 1
● Equipo 1 Sensor de CO 2 ● Valor de Referencia



PRUEBAS Y RESULTADOS

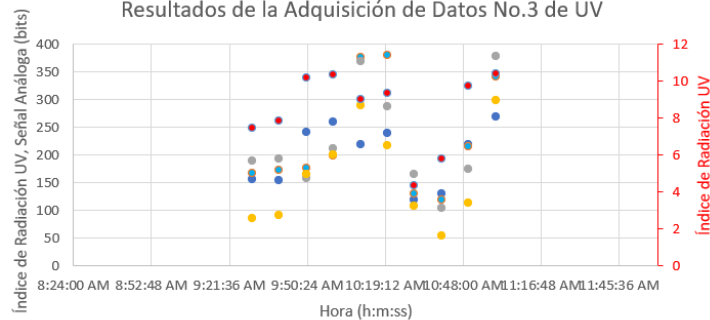
Radiación UV

Resultados de la Adquisición de Datos No.1 de UV



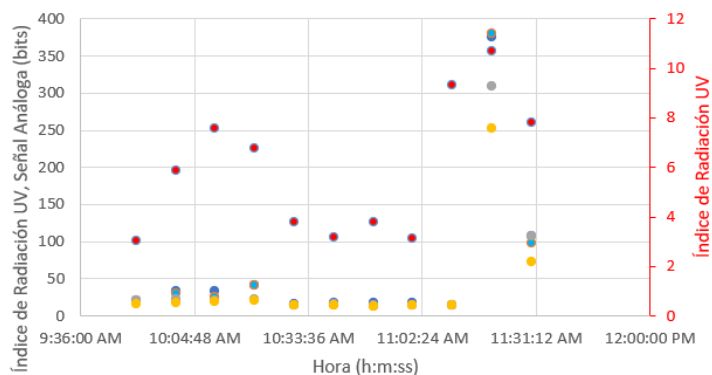
● Equipo 1 Sensor 1 UV ● Equipo 1 Sensor 2 UV ● Equipo 2 Sensor 1 UV
● Equipo 2 Sensor 2 UV ● Valor de Referencia

Resultados de la Adquisición de Datos No.3 de UV



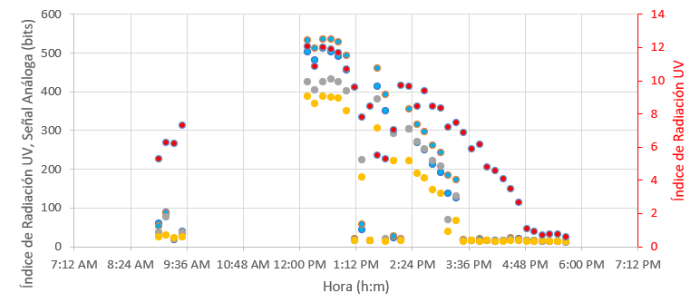
● Series1 ● Equipo 1 Sensor UV 2 ● Equipo 2 Sensor UV 1 ● Equipo 2 Sensor UV 2 ● Valor de referencia

Resultados de la Adquisición de Datos No.2 de UV



● Equipo 1 Sensor UV 1 ● Equipo 1 Sensor UV 2 ● Equipo 2 Sensor UV 1
● Equipo 2 Sensor UV 2 ● Valor de referencia

Resultados de la Adquisición de Datos No.4 de UV

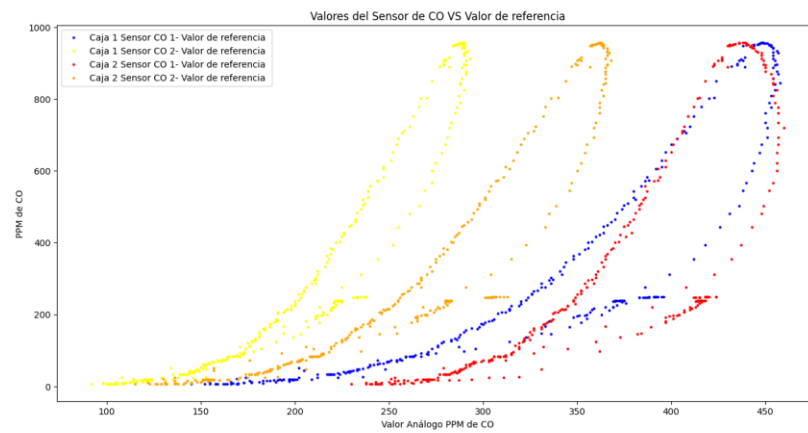
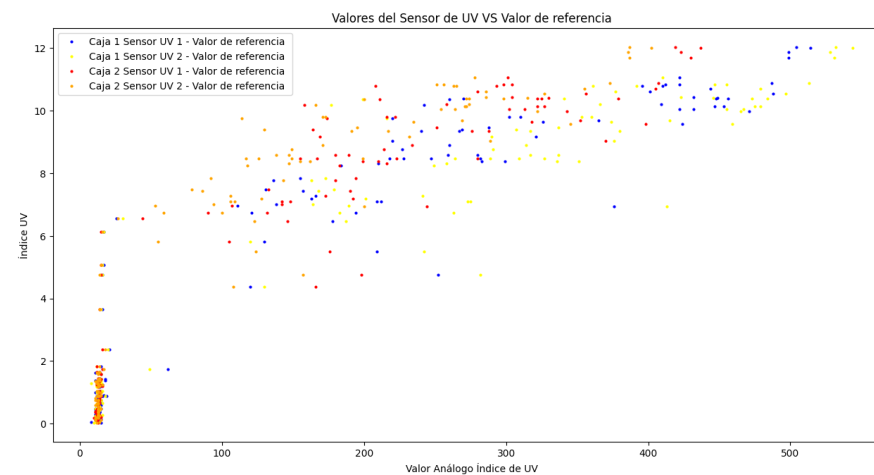
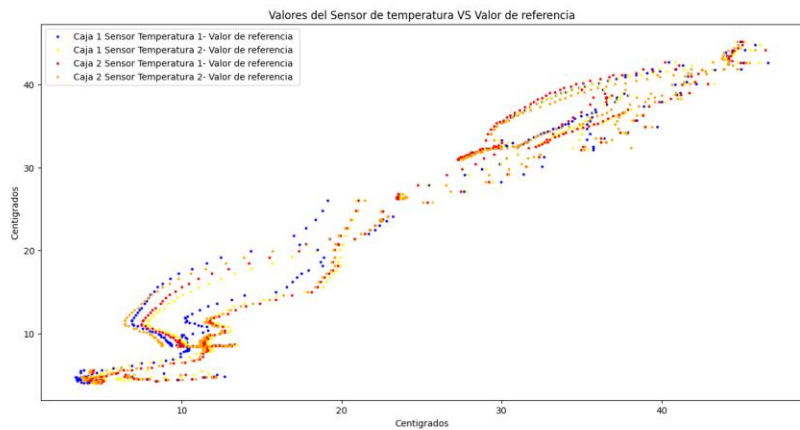


● Equipo 1 Sensor UV 1 ● Equipo 1 Sensor UV 2 ● Equipo 2 Sensor UV 1
● Equipo 2 Sensor UV 2 ● Valor de referencia



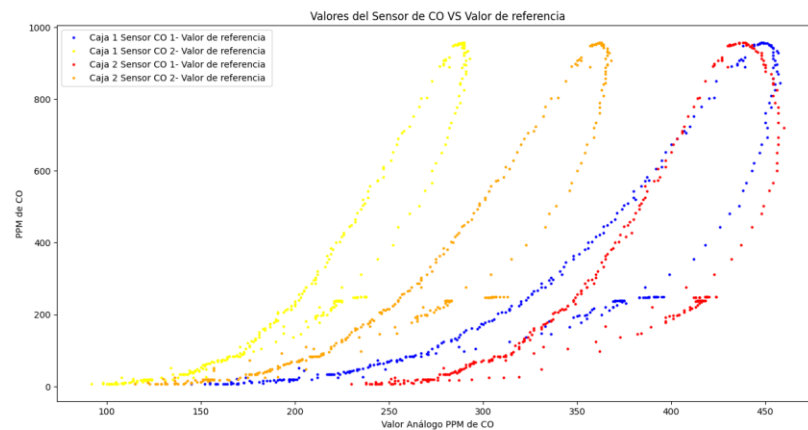
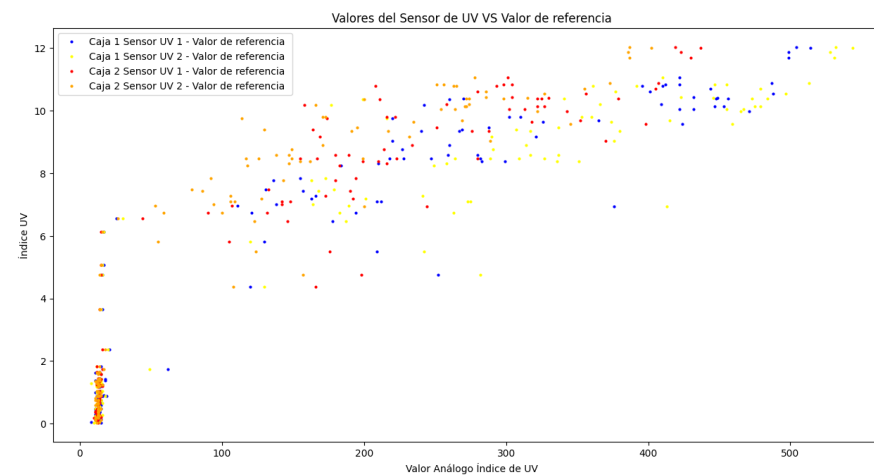
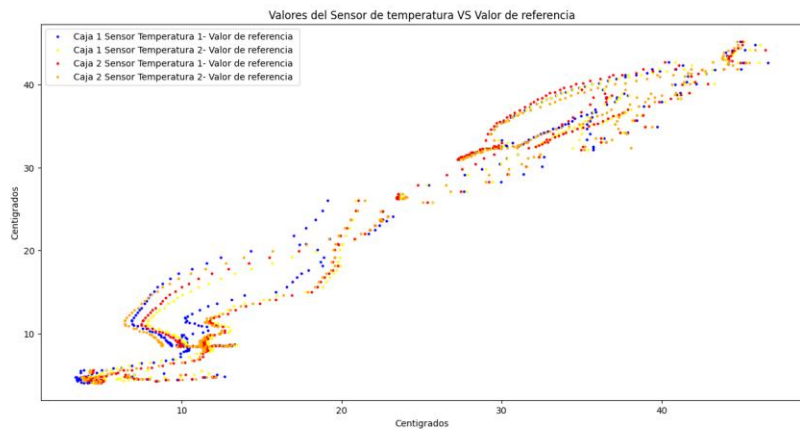
PRUEBAS Y RESULTADOS

Datos – Equipo de referencia



PRUEBAS Y RESULTADOS

Datos – Equipo de referencia



PRUEBAS Y RESULTADOS

Partial Least Squares (PLS)

Equipo 1

	Variables independientes	Variables dependientes	Coefficientes de Regresión	Término de Error	RMSE	RRMSE
Temperatura	Sensor 1 de Temperatura Sensor 2 de Temperatura	Valores del Equipo de Referencia de Temperatura	$\begin{bmatrix} -0.218 \\ 1.265 \end{bmatrix}$	-1.025	2.914 °C	6.589%
CO	Sensor 1 de CO Sensor 2 de CO	Valores del Equipo de Referencia de CO	$\begin{bmatrix} -2.553 \\ 7.151 \end{bmatrix}$	-17.965	61.102 PPM	8.123%
UV	Sensor 1 de UV Sensor 2 de UV	Valores del Equipo de Referencia de UV	$\begin{bmatrix} 1.992 \\ 0.613 \end{bmatrix}$	-5.684	1.3325	8.317%



PRUEBAS Y RESULTADOS

Partial Least Squares (PLS)

Equipo 2

	Variables independientes	Variables dependientes	Coefficientes de Regresión	Término de Error	RMSE	RRMSE
Temperatura	Sensor 1 de Temperatura Sensor 2 de Temperatura	Valores del Equipo de Referencia de Temperatura	$\begin{bmatrix} 0.478 \\ 0.563 \end{bmatrix}$	-0.607	2.805 °C	6.825%
CO	Sensor 1 de CO Sensor 2 de CO	Valores del Equipo de Referencia de CO	$\begin{bmatrix} -2.938 \\ 6.349 \end{bmatrix}$	-12.644	51.277 PPM	5.398%
UV	Sensor 1 de UV Sensor 2 de UV	Valores del Equipo de Referencia de UV	$\begin{bmatrix} 0.886 \\ 2.062 \end{bmatrix}$	-6.536	0.9382	7.918%



PRUEBAS Y RESULTADOS

Transferencia de calibración

Piecewise Direct standardization (PDS)

Tipo de Transferencia	Parámetros	Temperatura		CO PPM		Índice UV	
		RMSE Test 2 (°C)	RRMSE Test 2 (%)	RMSE Train 2 (PPM)	RRMSE Test 2 (%)	RMSE Train 2 (Índice)	RRMSE Test 2 (%)
Piecewise Direct standardization (PDS, DS)	Ancho de ventana: 3 Número de variables latentes para los modelos PLSR: 2	2.831	6.888	61.103	6.432	1.194	10.072
	Ancho de ventana: 3 Número de variables latentes para los modelos PLSR: 1	2.802	6.819	101.425	10.676	1.192	10.057
	Ancho de ventana: 1 Número de variables latentes para los modelos PLSR: 2	2.996	7.290	46.573	4.902	1.211	10.219
	Ancho de ventana: 1 Número de variables latentes para los modelos PLSR: 1	2.996	7.290	46.573	4.902	1.211	10.219

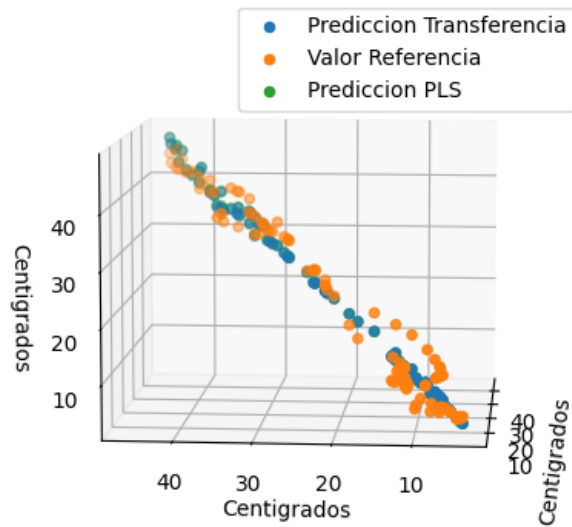


PRUEBAS Y RESULTADOS

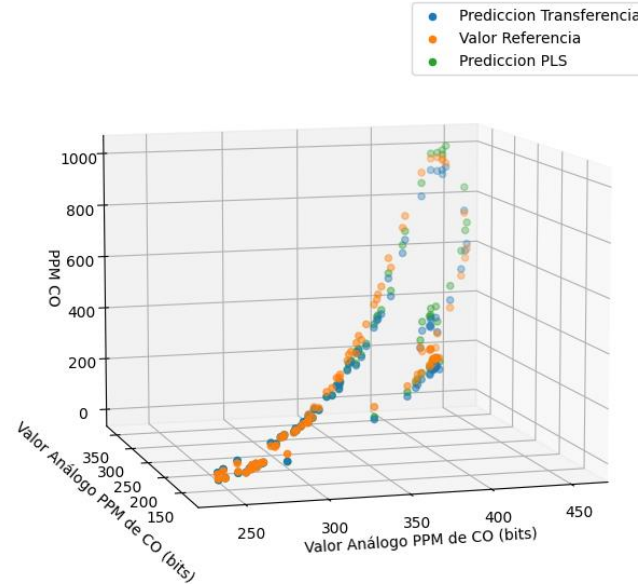
Transferencia de calibración

Piecewise Direct standardization (PDS)

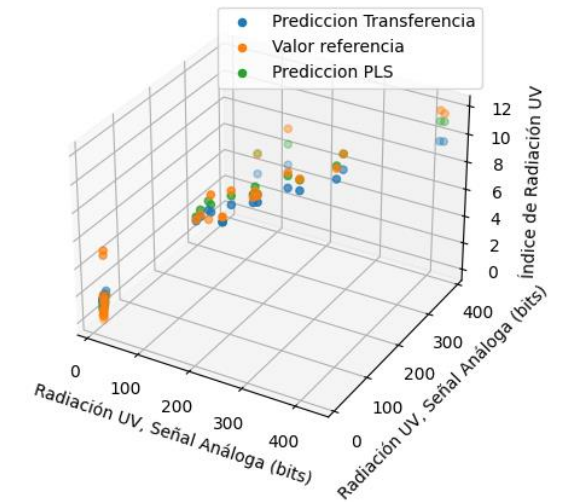
Temperatura



CO PPM



Radiación UV



PRUEBAS Y RESULTADOS

Transferencia de calibración

Spectral Space Transformation (SST)

Tipo de Transferencia	Parámetros	Temperatura		CO PPM		Índice UV	
		RMSE Test 2	RRMSE Test 2	RMSE Train 2	RRMSE Test 2	RMSE Train 2	RRMSE Test 2
		(°C)	(%)	(PPM)	(%)	(Índice)	(%)
Spectral Space Transformation (SST)	Número de componentes principales: 0	3.089	7.516	150.659	15.859	1.052	8.881
	Número de componentes principales: 1	3.031	7.374	51.130	5.382	1.015	8.564
	Número de componentes principales: 2	10.130	24.647	102.945	10.836	90.450	763.288
	Número de componentes principales: 3	12.903	31.395	247.996	26.105	4.048	34.157

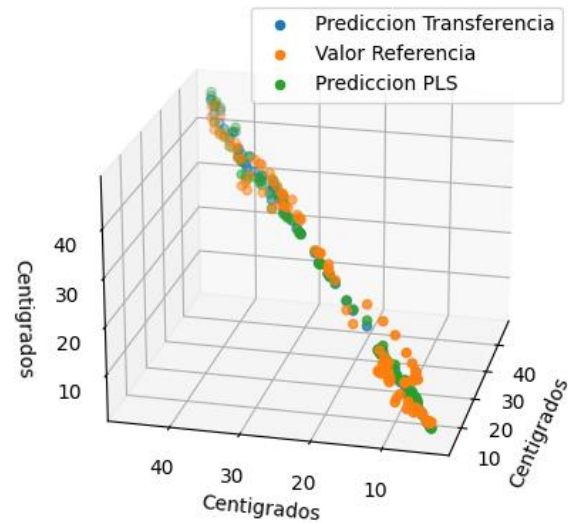


PRUEBAS Y RESULTADOS

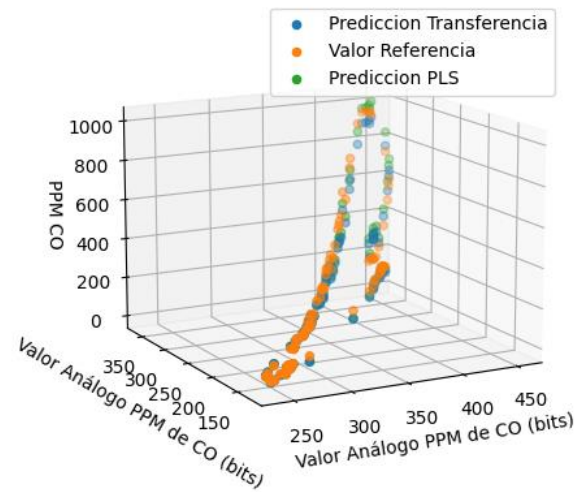
Transferencia de calibración

Spectral Space Transformation (SST)

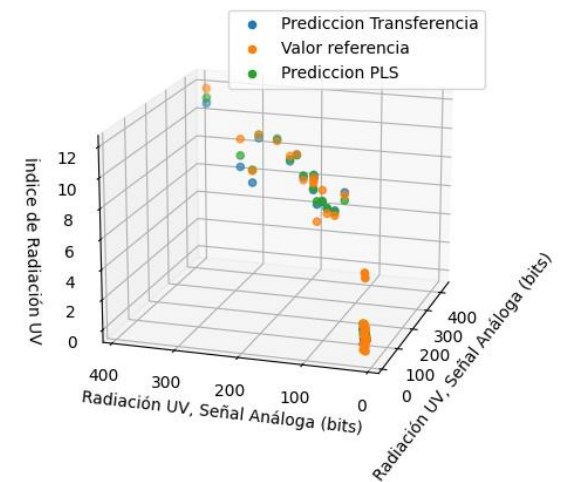
Temperatura



CO PPM



Radiación UV

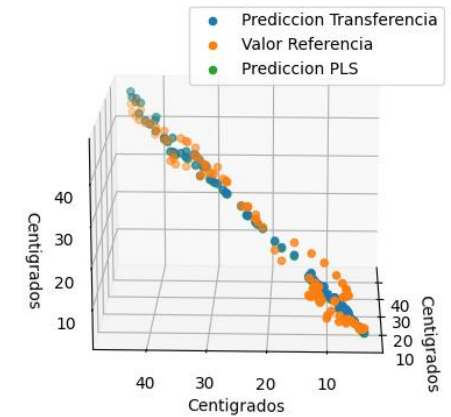


PRUEBAS Y RESULTADOS

Transferencia de calibración

Spectral Space Transformation (SST)

Tipo de Transferencia	Parámetros	Temperatura		CO PPM		Índice UV	
		RMSE Test 2 (°C)	RRMSE Test 2 (%)	RMSE Train 2 (PPM)	RRMSE Test 2 (%)	RMSE Train 2 (Índice)	RRMSE Test 2 (%)
Unsupervised dynamic orthogonal projection (uDOOP)	Número de componentes DOP a eliminar: 1	2.793	6.796	381.728	40.182	1.136	9.590
	Número de componentes para SVD: 20						
	Número de componentes DOP a eliminar: 2	3.097	7.535	1616.32	170.14	1.103	9.306
	Número de componentes para SVD: 20						
	Número de componentes DOP a eliminar: 0	3.097	7.535	1616.32	170.14	1.103	9.306
	Número de componentes para SVD: 20						
	Número de componentes DOP a eliminar: 1	3.389	8.245	381.060	40.112	47.760	403.03
	Número de componentes para SVD: 1						
Número de componentes DOP a eliminar: 1	9.694	23.586	288.806	30.401	6.506	54.903	
Número de componentes para SVD: 0							



CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un análisis comparativo de tres estrategias de transferencia de calibración: Piecewise Direct Standardization (PDS), Spectral Space Transformation (SST) y Unsupervised Dynamic Orthogonal Projection (uDOP), para calibrar los sensores de dos equipos gemelos. Estos equipos se sometieron a condiciones controladas para medir la temperatura y la concentración de CO en partes por millón mientras que la radiación UV se obtuvo naturalmente proveniente del sol. Los resultados se compararon con los obtenidos mediante el método de calibración multivariable, Partial Least Squares Regression (PLS). El análisis de los errores de estas estrategias demuestra la viabilidad de la transferencia de calibración para los sensores de variables medioambientales DS18B20, MQ-7 y GUVVA-S12SD, evidenciando mejoras en la precisión de la calibración, como se observa en los resultados donde se logró reducir el RRMSE en un 0.029% para la temperatura mediante uDOP, en un 0.49% para la concentración de CO mediante PDS, y se obtuvo un aumento de error no muy significativo de 0.643% para la radiación UV mediante SST, en comparación con los errores calculados por el método PLS.

Se completó el diseño e implementación de dos equipos de medición de variables medioambientales, incluyendo temperatura, PPM de CO y radiación UV. Estos equipos gemelos fueron construidos utilizando sensores medioambientales capaces de detectar y registrar estas variables de manera precisa. El análisis realizado demostró que los sensores usados son adecuados para capturar datos relevantes, los cuales son fundamentales para llevar a cabo la calibración de los sensores de los equipos gemelos en función de los equipos de referencia y tras las pruebas para la adquisición de datos en ambientes, donde se cambió a estas variables dentro de los rangos establecidos en ambientes controlados, se notó el funcionamiento de ambos equipos, junto a una respuesta equivalente a la obtenida por los equipos de referencia



CONCLUSIONES

Se hizo la calibración de los equipos 1 y 2 utilizando el método Partial Least Squares Regression (PLS), después de realizar la partición de los datos de los sensores y los valores de referencia. Se calcularon la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Relativo de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RRMSE) para evaluar la precisión de las mediciones. Se observó que ambos equipos mostraron valores de RMSE para los sensores de CO de 61.102 PPM y 51.277 PPM respectivamente y los sensores de radiación UV de 1.3325 y 0.9382 de índice de radiación UV, posiblemente atribuibles a diferencias en la sensibilidad entre los sensores y el equipo de referencia o a la estrategia de adquisición de datos usada. Sin embargo, los errores relativos de 8.123% y 5.3298% para los sensores de CO y 8.317% y 7.918% para los sensores de radiación UV, indican una precisión consistente en las mediciones, lo que sugiere una pequeña discrepancia en relación con el rango de mediciones realizadas. En resumen, los resultados respaldan la fiabilidad y precisión de los equipos de medición una vez realizada la calibración mediante PLS.

Después de llevar a cabo la transferencia de calibración y calcular los errores con los datos de prueba, se pudo determinar la viabilidad de los métodos Piecewise Direct Standardization (PDS), Spectral Space Transformation (SST) y Unsupervised Dynamic Orthogonal Projection (uDOP) para la calibración de estos sensores. Se observó que, dependiendo de los parámetros utilizados en cada estrategia, se obtuvieron errores comparables o incluso inferiores a los obtenidos mediante el método de calibración multivariable común PLS. Si se busca encontrar una sola estrategia de transferencia de calibración para aplicar a todos los sensores, y no tener un gran aumento de error en comparación con el método PLS se recomienda el método SST con el parámetro “número de componentes” de 1, ya que el RRMSE más grande entre las tres variables es de 8.564% en el índice de radiación UV, en comparación con el error del método PLS, que es del 7.918%, con un aumento solo de 0.646%. Por otro lado, la estrategia PDS con parámetros de “ancho de ventana” de 1 y 2 variables latentes también puede ser recomendada con el RRMSE más grande entre las tres variables, con un 10.219% en radiación UV, en comparación con el error presentado por el método de calibración PLS, que es de 7.918% con un aumento de error de 2.301%. Lo que muestra la viabilidad de estas estrategias, que al aplicarse en la calibración de sensores de medición de variables medioambientales podría resultar en ahorros significativos tanto en tiempo como en costos asociados con la calibración tradicional multivariable.



Recomendaciones

Se recomienda verificar que los sensores adquiridos hayan sido manufacturados por la misma compañía y que sean idénticos. En caso contrario, los equipos no podrían considerarse gemelos y la transferencia de calibración no sería tan efectiva.

Es importante recordar que estos equipos están destinados a la monitorización medioambiental. Por lo tanto, al variar las variables ambientales, como la temperatura, se deben simular condiciones naturales de forma adecuada. Por ejemplo, para alterar la temperatura medida por los sensores, se deben utilizar métodos que imiten los cambios ambientales reales, en lugar de exponer los sensores directamente a agua fría o caliente.

Para obtener mediciones precisas de CO, se recomienda utilizar carbón para incrementar gradualmente las partes por millón (PPM) en el entorno controlado. A diferencia del humo de cigarrillo u otras fuentes de CO, el carbón permite un aumento más controlado de las concentraciones de CO, lo que facilita la obtención de datos suficientes para la calibración sin exceder los límites del equipo de referencia.

Para la adquisición óptima de datos de CO, se sugiere el uso de un compresor de monóxido de carbono, lo que garantiza una distribución uniforme del gas en el entorno controlado y una mayor precisión en las mediciones.

Para una calibración más precisa de los sensores UV, se recomienda utilizar espectrorradiómetros UV de baja luz rasante como dispositivos de referencia y lámparas ultravioleta para simular variaciones en la radiación UV.

Se debe tener en cuenta que los errores calculados no son absolutos y pueden variar según la muestra obtenida para la realización de pruebas



¡Gracias!



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA