



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

DESARROLLO DE UN SISTEMA INSTRUMENTAL BASADO EN REDES
INALÁMBRICAS PARA EVALUAR EL PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

APARICIO HERNÁNDEZ MIGUEL ÁNGEL

TUTOR

DRA. VELASCO HERRERA GRACIELA, ICAT UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, JULIO 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

El presente trabajo de tesis nivel maestría fue desarrollado en el Laboratorio de Sistemas Inteligentes del Instituto de Ciencias y Aplicadas y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la tutoría de la Dra. Graciela Velasco Herrera y las asesorías del Dr. Miguel Ángel Bañuelos Saucedo y del Doctor Ernst Kussul. Beca CONACYT 2018-000068-02NACF-26262. Además, este trabajo forma parte de los resultados de la participación en proyectos relacionados con el desarrollo de sistema instrumental inteligente de alerta y clasificación, estudio de zonas de reserva protegida e incendios forestales. Convenio Eespecífico de Colaboración No. de Registro UNAM 55503-1004-20-VI; Estímulo Especial *Marcos Mazari Menzer*. Oficio/CJIC/CTIC/4926/2019, UNAM y Proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT IT 102320

Jurado Asignado:

Presidente	Dr. De La Rosa Nieves Saúl
Secretario	Dra. Baydyk Mykolaivna Tetyana
1 ^{er} . Vocal	Dra. Velasco Herrera Graciela
2 ^{do} . Vocal	Dr. Bañuelos Saucedo Miguel Ángel
3 ^{er} . Vocal	Dr. Valdés Barrón Mauro Germán

Asesoría:

Dr. Ernst Kussul

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.
ICAT, UNAM.

TUTORA DE TESIS:

Dra. Graciela Velasco Herrera

FIRMA

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la UNAM.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado durante la realización de mis estudios de maestría.

A los miembros del jurado, por los comentarios y observaciones que ayudaron a mejorar este trabajo de tesis.

A la Doctora Graciela Velasco, por su apoyo durante la realización de este trabajo.

A mis padres, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional durante toda mi vida. Gracias por su dedicación y esfuerzo, siempre buscando lo mejor para nosotros, su familia. Gracias por nunca rendirse ya que gracias a ustedes estoy en este punto de mi vida. Gracias por todo el tiempo que me han dedicado, por sus consejos y gracias por siempre alentarme durante toda mi vida.

A mi hermana, quien siempre me ha brindado su apoyo y confianza. A mi sobrino, quien en el tiempo que he compartido con él, me ha brindado de gran felicidad.

A mis amigas Itzel, Gabriela y Karen, quienes me han brindado su apoyo y amistad incondicional.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO PRINCIPAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1. ANTECEDENTES	2
1.1. Incendios forestales	2
1.2. Sistemas para la detección de fuego forestal	3
1.3. Conceptos de riesgo, peligro y vulnerabilidad.....	9
1.4. Sistemas de Alerta Temprana.....	10
1.4.1. Niveles de alerta y peligro.....	12
1.4.2. Sistemas SAT de monitoreo atmosférico.....	12
1.5. Monitoreo atmosférico en México	14
1.5.1. Detección y Seguimiento de Incendios Forestales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)	15
1.5.2. Sistema de alerta temprana de incendios de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).....	16
2. CASO DE ESTUDIO: RESERVA ECOLOGÍA DEL PEDREGAL DE SAN ÁNGEL.....	19
2.1. Zonificación de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel.....	20
2.2. Prevención y combate de incendios forestales en la REPSA	21
2.3. Especies introducidas en el pedregal.....	25
3. INSTRUMENTACIÓN Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN CIUDAD UNIVERSITARIA	27
3.1. Definición de estación meteorológica.....	27
3.2. Red de estaciones meteorológicas	28
3.3. Estaciones automáticas y no automáticas	28
3.4. Tipos de estaciones meteorológicas	28
3.5. Requerimientos de las estaciones meteorológicas automáticas.....	30
3.6. Red de estaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias	31
3.7. Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario	32
3.8. Monitoreo atmosférico en el ICAT.....	34
3.8.1. Descripción de la estación ICAT	34
4. SISTEMAS DIFUSOS COMO HERRAMIENTA PARA EVALUAR EL PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES	36
4.1. Lógica difusa	36
4.1.1. Variables lingüísticas	37
4.1.2. Reglas difusas.....	38
4.1.3. Estructura de un controlador difuso	38

4.2.	Sistemas difusos para evaluar el peligro de incendios forestales	43
4.3.	Análisis de datos utilizando inteligencia artificial	46
5.	DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO PARA LA EVALUACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES	47
5.1.	Diagrama conceptual del sistema inteligente de monitoreo	47
5.2.	Características del sistema de monitoreo	48
5.3.	Requerimientos y especificaciones de las estaciones de monitoreo	49
5.4.	REPSA: dimensiones y definición de los puntos estratégicos de ubicación para las estaciones meteorológicas complementarias.....	51
5.3.1.	Desarrollo de los puntos estratégicos	56
5.5.	Desarrollo de las estaciones meteorológicas.....	59
5.4.1.	Selección de sensores de humedad y temperatura	59
5.4.2.	Almacenamiento de datos.....	61
5.4.3.	Envío y recepción de datos; selección del dispositivo de comunicación	62
5.4.4.	Selección de microcontrolador	65
5.4.5.	Fuente de alimentación para las estaciones de monitoreo	66
5.4.6.	Diagrama de la estación de monitoreo	75
5.4.7.	Desarrollo de la interfaz del usuario (Base central)	78
6.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA PARA LA EVALUACIÓN DE UN POSIBLE INCENDIO FORESTAL, PRUEBAS Y RESULTADOS	80
6.1.	Prueba de comunicación inalámbrica	80
6.2.	Calibración de los sensores	82
6.3.	Puesta en marcha y pruebas de funcionalidad del sistema de monitoreo	84
6.4.	Análisis de datos	87
6.5.	Sistema de alerta la evaluación de un posible incendio forestal desarrollado	95
7.	CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	96
8.	ANEXOS.....	99
8.1.	Análisis de datos utilizando inteligencia artificial	99
8.1.1.	Inteligencia artificial	99
8.1.2.	Machine Learning.....	99
8.1.3.	Deep learning.....	104
	REFERENCIAS.....	129

INTRODUCCIÓN

En este trabajo, se presenta el diseño y desarrollo de un sistema instrumental basado en redes inalámbricas para evaluar el peligro de incendios forestales, como caso de estudio la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA). Se realizó un estudio de la zona en donde ocurre este evento y se clasificó por subzonas; en donde se propone ubicar una red de estaciones en diferentes puntos estratégicos para monitorear y evaluar de forma local y oportuna, el peligro de incendio en la reserva antes de que se detone.

En el primer capítulo se presentan los antecedentes de los incendios forestales. En el segundo capítulo se presenta el caso de estudio. En el tercer capítulo se presentan los sistemas de alerta que existen, las tecnologías de las que hacen uso, así como sus requerimientos. En el cuarto capítulo se presenta la lógica difusa, así como los sistemas difusos utilizados para la evaluación del peligro de incendios forestales. En el quinto capítulo se presenta una descripción general del diseño del sistema de monitoreo para la evaluación de incendios forestales. En el sexto capítulo se presenta la implementación del sistema, así como el análisis de toma de decisiones haciendo uso de lógica difusa y los resultados. En el séptimo capítulo se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro; además se tiene un apartado de referencias bibliográficas y anexos.

OBJETIVO PRINCIPAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desarrollar un sistema instrumental basado en redes inalámbricas ubicadas en diferentes puntos estratégicos para evaluar el peligro de incendios forestales antes de la intervención humana en la REPSA.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollo de una red de estaciones inalámbricas para monitorear variables meteorológicas.
- Desarrollo de un algoritmo para encontrar los puntos estratégicos en donde se propone ubicar las estaciones de monitoreo inalámbricas.
- Desarrollo e implementación de las estaciones de monitoreo individuales.
- Desarrollo de un sistema de análisis para la evaluación de la presencia de un posible incendio forestal.

1. ANTECEDENTES

1.1. Incendios forestales

Los incendios forestales son un fenómeno que se presentan no solo en México, sino en el mundo entero. Este fenómeno requiere de un monitoreo, debido a que la vegetación es un gran sumidero de carbono, con los bosques del mundo se eliminan un estimado de 2.1 gigatoneladas de dióxido de carbono anualmente [1].

El impacto ambiental que acontece después del paso de este fenómeno natural es uno de los problemas ambientales más importantes que recientemente se han visto todo el mundo, en particular en México y es un fenómeno que estudio y de actual interés por la comunidad científica, que está en la búsqueda de integrar nuevos instrumentos de detección monitoreo, estudio y análisis, así como proponer nuevos modelos de pronósticos a corto, mediano y largo plazo con el fin de minimizar las afectaciones en el medio ambiente, ecosistemas y la población [2].

Un incendio forestal se define como la propagación libre y no programada del fuego sobre la vegetación en los bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas. El combustible es el factor principal que determina la magnitud de este [3].

El fuego para algunos ecosistemas es un factor determinante y de impacto positivo para la naturaleza, que mantiene la biodiversidad en equilibrio. Sin embargo, cuando rebasa un umbral se generan consecuencias devastadoras para el medio ambiente, los ecosistemas, la salud y seguridad de las personas [4].

Se ha registrado que las actividades humanas ocasionan el 99% de estos incendios y sólo el resto tiene como de causa natural como: descargas eléctricas, erupciones volcánicas, etc. Se estima que en los últimos años (Figura 1), el promedio de los incendios anuales se puede visualizar que el 50% se producen por actividades agropecuarias y de urbanización y el resto se divide en acciones intencionadas, descuidos por fumar o creación de fogatas, además de prácticas de los cazadores [4].

CAUSAS PRINCIPALES	
ACCIDENTALES	Rupturas de líneas eléctricas, accidentes automovilísticos, ferroviarios y aéreos.
NEGLIGENCIAS	Quemas agropecuarias no controladas, fogatas de excursionistas, fumadores, quema de basura, limpieza de vías en carreteras y uso del fuego en otras actividades productivas dentro de áreas forestales.
INTENCIONALES	Quemas por conflictos entre personas o comunidades, tala ilegal o litigios.
NATURALES	Caída de rayos o erupciones volcánicas.

Figura 1. Causas de incendios forestales [4]

1.2. Sistemas para la detección de fuego forestal

Actualmente, se usan técnicas y métodos para la detección de incendios forestales, como: 1) guardabosques que monitorean desde una base central (vigilante fijo, agente forestal), 2) vigilantes que verifican una zona en particular utilizando dispositivos y vehículos terrestres o aéreos no tripulados, 3) sistemas automáticos con cámaras de detección de humo, térmicas, cámaras RGB, sensores de emisiones químicas, entre otras. Estos métodos permiten el monitoreo e identificación de fuego para envío de alertas y seguir los protocolos de prevención, estrategias y respuesta [5].

Los sistemas de monitoreo y detección oportuna requieren identificar posibles escenarios de las consecuencias del impacto del fenómeno de acuerdo con la zona local o regional, tomado en cuenta, por ejemplo, las variables meteorológicas y geográficas, para generar de manera automática una evaluación de peligro que permita desarrollar planes de prevención, contingencia y resiliencia.

Los sistemas de detección de nubes de humo permiten la detección automática en un radio de alcance de 15km. Los sistemas cuentan con sensores ópticos que realizan un monitoreo continuo de 24h y cuentan con una capacidad de supervisión de 700km², además se realiza un análisis de imágenes, con un tiempo de 3 minutos promedio para detección del fuego [5].

Los sistemas de detección que usan sensores para emisiones químicas se utilizan a nivel de superficie y no necesitan de una línea de vista; una desventaja es que estos sensores consumen energía de calentamiento, por lo cual, es necesario que no sobrepasen los 40°C [6].

Otros sistemas hacen uso de redes inalámbricas sensoriales, la ventaja de estos es el ahorro de energía y para ello se han implementado nuevos protocolos para cumplir con esta tarea [7]. La creación de estándares tales como el IEEE 802.15.4, ha permitido crear sistemas para la implementación de redes sensoriales inalámbricas tales como Natura Sys [7], este es utilizado particularmente para la prevención, monitoreo y detección de incendios forestales, su ventaja es el bajo consumo energético, permitiendo el ahorro de recursos [7].

En el trabajo [8] se propone un sistema de red inalámbrica sensorial inteligente; donde se utilizan sensores de luz visible, luz infrarroja, temperatura y humedad. En el sistema, cada sensor utilizado es alimentado por una celda solar y el objetivo fue detectar los incendios forestales con escenarios de día y de noche utilizando una red neuronal artificial multicapa con retropropagación (backpropagation). Los resultados de este sistema muestran una tasa de detección del 90% de incendios con cero falsas alarmas en escenarios normales.

En el trabajo [9] se describe un sistema para la detección de incendios forestales usando redes inalámbricas. En el sistema propuesto se hace un análisis del estándar IEEE 802.15.4 utilizado por los módulos Xbee Series 2, Xbee Pro-2,4 GHz y Xbee Pro de 900 MHz con el fin de determinar la eficacia de este protocolo en un espacio abierto. Los resultados de las pruebas realizadas indicaron que la versión Xbee Pro-2.4GHz es la adecuada para implementar en espacios abiertos con obstáculos, ya que esta versión obtuvo un rendimiento del 96.30%.

En el trabajo [10] se describe el diseño de un sistema para la detección de incendios forestales, en este se hace uso de sensores de humedad, temperatura y calidad del aire. Para la adquisición de los datos, se usó el microcontrolador ATtiny167 y para la comunicación inalámbrica se utilizó el protocolo bluetooth. Para la visualización se diseñó una interfaz gráfica en la cual se muestran los datos recibidos por las estaciones de monitoreo. Tras haber realizado pruebas de funcionalidad, se determinó que las variables meteorológicas implementadas son un buen indicador de la presencia de fuego.

En el trabajo [11] se describe un sistema de comunicación inalámbrica para la detección de incendios forestales, en el cual se hace uso de una red de sensores. En esta se utilizó un sensor de control de calidad de aire, esto con el fin de detectar la contaminación de la zona bajo monitoreo. Para la comunicación de datos se implementó el protocolo de comunicación Zigbee usando la tarjeta XBee PRO y el microcontrolador usado fue el ATmega2560. En este sistema, se obtuvo un alcance máximo de comunicación de 120 m entre cada una de las estaciones de monitoreo, además se propone la implementación de 90 estaciones para un área de 911,800 m².

En el trabajo [12] se propone una red inalámbrica de sensores, la cual hace uso del protocolo Zigbee, el cual permitió monitorear variables de humedad, temperatura y radiación solar. Estas ayudan a prevenir y detectar incendios forestales, y en consecuencia se puedan tomar las medidas necesarias. En este trabajo se hace una estimación del número de estaciones necesarias, así como su costo.

En el trabajo [13] se describe el diseño de un sistema para la detección de incendios forestales utilizando una red de sensores inalámbricos. En este sistema se usaron sensores de humedad, temperatura, detección de flama y de humo. Para la recolección de datos se utilizó una tarjeta Raspberry Pi, y se implementó el protocolo de comunicación Wi-Fi. Los datos recolectados se envían a una base de datos y se presentan al usuario en una página web, en donde se emite una alarma preventiva de un posible incendio forestal.

En el trabajo [14] se propone un sistema para la detección de incendios forestales, este sistema hace uso de las redes inalámbricas sensoriales. Tras haber analizado las causas de los incendios forestales, se determinó que los sensores de temperatura y humedad son los necesarios para trabajar en esta tarea. Para la adquisición de datos se utilizó la tarjeta de desarrollo Arduino Mini Pro, la cual cuenta con el microcontrolador ATmega328P. Para la comunicación de datos se implementó el protocolo de comunicación Zigbee usando la tarjeta XBee S1 PRO ya que esta cuenta con un mayor alcance en la comunicación y una mayor penetración entre las zonas con obstáculos. Para la visualización de los datos se diseñó una interfaz gráfica en el software MATLAB, en ella se pueden observar las gráficas del comportamiento de humedad y temperatura, con base en esos datos se determina la probabilidad de la presencia de un incendio forestal. Por último, se genera un registro de los datos que se han recolectado.

En la (Tabla 1) se muestra la comparación de los sistemas de monitoreo para la detección de incendios forestales.

Tabla 1. Comparación de los sistemas de monitoreo para la detección de incendios forestales

Sistema	Sensores	Comunicación	Microcontrolador / Tarjeta de desarrollo	Tiempo de monitoreo	Tipo de sistema
Detección por nubes de humo [5]	Sensores ópticos para la detección de nubes de humo	Alámbrica e inalámbrica	-----	24 horas constantes	Semi automático
Detección de emisiones químicas [6]	Sensores de CO, CO2 y humo	Alámbrica e inalámbrica	-----	6 horas constantes	Automático
Red sensorial inalámbrica (Zigbee) [7]	Sensor de humedad temperatura y gas CO2 y gas LP	Inalámbrica Zigbee	ATmega328P	24 horas constantes	Automático
Red sensorial inalámbrica inteligente [8]	Sensor de luz visible, luz infrarroja, temperatura y humedad	Inalámbrica	-----	24 horas constantes	Automática
Red sensorial inalámbrica [9]	-----	Inalámbrica Zigbee	-----	24 horas constantes	Automática
Red sensorial inalámbrica [10]	Sensor de humedad, temperatura y calidad del aire	Inalámbrica Bluetooth	ATtiny167	24 horas constantes	Automática
Red sensorial inalámbrica [11]	Sensor de calidad del aire	Inalámbrica Zigbee	ATmega2560	24 horas constantes	Automática
Red sensorial inalámbrica [12]	Sensor de humedad,	Inalámbrica Zigbee	Texas instruments CC2420	24 horas constantes	Automática

	temperatura y radiación solar				
Red sensorial inalámbrica [13]	Sensor de humedad, temperatura, flama y humo	Inalámbrica Wi-Fi	Raspberry Pi	24 horas constantes	Automática
Red sensorial inalámbrica [14]	Sensor de humedad y temperatura	Inalámbrica Zigbee	Arduino Mini Pro ATmega328P	24 horas constantes	Automática

Tras haber realizado una investigación, se encontró que los microcontroladores son utilizados principalmente para la recolección de los datos obtenidos por los sensores que son implementados en el sistema. Los microcontroladores cuentan con puertos de entrada y salida suficientes para implementar las diversas variables meteorológicas que necesitan ser monitoreadas, tales como la humedad, temperatura, calidad de aire, entre otras. Estos permiten la conexión no solo con sensores del tipo digital, sino también del tipo analógico. Una característica importante que se considera al momento de seleccionar el microcontrolador es la compatibilidad con el protocolo de comunicación que se pretende utilizar. En la (Tabla 2) se presentan las especificaciones de los microcontroladores que han sido utilizados en sistemas para la detección de incendios forestales.

Tabla 2. Especificaciones de microcontroladores

	ATmega328P (PDIP)	ATmega328P (TQFP)	ATtiny167 (QFN32)	Raspberry Pi 3b+
Marca	ATMEL	ATMEL	ATMEL	
Procesador	AVR	AVR	AVR	Cortex-A53
Puertos digitales	14	23	16	26
Puertos analógicos	6	8	11	-----
Puertos PWM	6	6	1	-----
Memoria flash	32 KB	32 KB	16KB	
SRAM	2 KB	2 KB	512 bytes	
RAM	-----	-----	-----	1 GB
EEPROM	1 KB	1 KB	512 bytes	
Protocolos de comunicación	SPI, I2C, USART	SPI, I2C, USART	SPI, I2C, USART	SPI, I2C
Voltaje de operación	2.7V a 5.5V	2.7V a 5.5V	1.8V a 5.5V	5V
Costo (USD)	\$1.9	\$2.0	\$1.52	\$35.0

Los protocolos de comunicación inalámbrica documentados que son implementados frecuentemente son el Zigbee, wi-fi y bluetooth. De estos protocolos el que más destaca es el Zigbee, ya que el monitoreo de zonas para la detección de incendios forestales es grande (mayores a 200 hectáreas). Este protocolo permite realizar una conexión inalámbrica de hasta 120 metros de distancia (dependiendo del modelo), además cuenta con compatibilidad con un gran número de microcontroladores y tarjetas de desarrollo que son implementadas en sistemas para la detección de incendios forestales.

Si bien, en diversos trabajos se ha optado por usar protocolos como el wi-fi y el bluetooth, se recomienda hacer uso de otros protocolos de comunicación ya que estos anteriores suponen una desventaja en cuanto al alcance en la comunicación, pudiendo llegar hasta los 50 metros de distancia. En la (Tabla 3) se presentan las especificaciones de los protocolos de comunicación que han sido utilizados en sistemas para la detección de incendios forestales.

Tabla 3. Especificaciones de protocolos de comunicación

	Bluetooth	Zigbee	Wi-Fi	LoRaWAN
Frecuencia	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 y 5 GHz	Diversas
Velocidad de transmisión de datos	1 Mbps	250 kbps	2,4 GHz	0.3-50 kbps
Alcance	20 m	10-120 m	50 m	15 km
Potencia de transmisión de datos	0,4,10 dBm	12 dBm	15 dBm	14 dBm

En la investigación realizada, se encontró que las variables meteorológicas que necesitan ser monitoreadas para la detección de un incendio forestal son principalmente la humedad y la temperatura. Adicionalmente en los sistemas desarrollados, se propone usar sensores de gas, humo e incluso sensores para la detección de flama. Por una parte, los sensores de humedad y temperatura monitorean las condiciones meteorológicas de la zona de trabajo y los sensores de gas y humo complementan al sistema, ya que estos proporcionan información referente a la calidad del aire de la zona que se está monitoreando. Sin embargo, la implementación de sensores de gas y humo necesitan de un proceso más riguroso en comparación a los sensores de humedad y temperatura, ya que estos necesitan contar con características específicas en tareas como lo es el monitoreo de incendios forestales. En la (Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6) se presentan las especificaciones de los sensores de humedad, temperatura y gases que han sido utilizados en sistemas para la detección de incendios forestales.

Tabla 4. Especificaciones de sensores de humedad

	DHT11	DHT22	HIH 5031
Resolución	± 1 %HR	0.1 %HR	0.1 %HR
Repetibilidad	± 1 %HR	± 0.3 %HR	± 0.5 %HR
Exactitud	± 4 %HR	± 2 %HR	± 3 %HR
Rango de medición	20 a 90 %HR	0 a 100 %HR	0 a 100 %HR
Tiempo de respuesta	10 s	< 5 s	< 5 s

Tabla 5. Especificaciones de sensores de temperatura

	DHT11	DHT22	TMP36
Resolución	1 °C	0.1 °C	0.1 °C
Repetibilidad	± 1 °C	± 0.2 °C	
Exactitud	± 1 °C	± 0.5 °C	± 2 °C
Rango de medición	0 a 50 °C	-40 a 80 °C	-40 a 128 °C
Tiempo de respuesta	6 s	< 10 s	< 1 s

Tabla 6. Especificaciones de sensores de gas

	MQ-2	MQ-7	MQ-135
Tipo de gas	Gas LP Propano Hidrógeno	Monóxido de Carbono	Amoniaco Sulfuro Benceno Humo
Resolución	-----	-----	-----
Rango de medición	300 a 10000 ppm	20 a 2000 ppm	10 a 1000 ppm
Tiempo de respuesta	< 10 s	< 10 s	< 10 s
Precisión	-----	-----	-----

1.3. Conceptos de riesgo, peligro y vulnerabilidad

Al evaluar los escenarios de incendios forestales u otros eventos naturales, se tienen conceptos tales como el riesgo, el peligro, la vulnerabilidad y la exposición o grado de exposición, estos se definen de la siguiente manera [15]:

El riesgo se define como la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas que han sido constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como resultado del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. La probabilidad de que ocurran dichos eventos en una región constituye una amenaza, la cual se entiende como la condición latente de una posible generación de eventos perturbadores.

El peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno que es catalogado como potencialmente dañino de cierta intensidad, el cual puede ocurrir durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado. En el estudio de este es importante que se definan los fenómenos mediante parámetros cuantitativos con un significado físico y preciso, tal que pueda ser medido numéricamente y que pueda ser asociado mediante relaciones físicas con los efectos del fenómeno sobre los bienes expuestos. En la mayoría de los fenómenos pueden distinguirse una medida de magnitud y otra de intensidad. La magnitud es una medida que define el tamaño del fenómeno, de su potencial destructivo y de la energía que libera. La intensidad es una medida de la fuerza con la que se manifiesta el fenómeno en un sitio dado. Por tal motivo, un fenómeno tiene una sola magnitud, pero puede tener tantas intensidades como son los sitios en que sea necesario determinar sus efectos.

La vulnerabilidad se define como la susceptibilidad de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas. Generalmente pueden distinguirse dos tipos de vulnerabilidad, la física y la social:

- La vulnerabilidad física se expresa como una probabilidad de daño de un sistema expuesto, generalmente se expresa a través de una función matemática o matriz de vulnerabilidad con valores entre cero y uno. Un valor de cero implica que el daño sufrido ante un evento de cierta intensidad es nulo, y uno, implica que este daño es igual al valor del bien expuesto.
- La vulnerabilidad social puede valorarse de forma cualitativa y es relativa, ya que esta se relaciona con aspectos económicos, educativos, culturales, así como el grado de preparación de las personas.

La exposición o grado de exposición se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio donde se presenta un fenómeno y que son

factibles de ser dañados. Generalmente se asignan unidades monetarias, ya que es común que así sea expresado el valor de los daños. En ocasiones, pueden ser empleados valores como porcentajes de determinados tipos de construcción o incluso, el número de personas que son susceptibles a verse afectadas. Este es un parámetro que varía con el tiempo, ya que se encuentra íntimamente ligado al crecimiento y desarrollo de la población y su infraestructura. Si el valor de lo expuesto es mayor, el riesgo que se enfrenta también es mayor. Si el valor de lo expuesto es nulo, el riesgo también será nulo, independientemente del valor del peligro. La exposición puede disminuir con el alertamiento anticipado de la ocurrencia de un fenómeno, ya sea a través de una evacuación o inclusive evitando el asentamiento en el sitio.

1.4. Sistemas de Alerta Temprana

Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) son un conjunto de instrumentos y procedimientos, a través de los cuales se monitorea una amenaza o evento adverso de carácter previsible; se capturan y procesan datos e información, ofreciendo pronósticos temporales sobre su acción y posibles efectos. Un SAT necesariamente debe comprender cuatro elementos fundamentales: (Figura 2) [16].



Figura 2. Componentes de un sistema de alerta temprana [16]

1) Conocimiento previo del riesgo asociado al peligro

Los riesgos surgen de la combinación de peligros y vulnerabilidades que pueden presentarse en una región en particular en un momento dado. El conocimiento del riesgo crea conciencia y sensibiliza a las personas que van a ser alertadas, además

permite priorizar las necesidades de los sistemas de alerta temprana y facilita la preparación de la respuesta ante el fenómeno que puede presentarse [16].

El conocimiento previo del riesgo implica realizar un mapeo de las amenazas de forma regular, además es necesario mantener esta información actualizada. Una herramienta muy utilizada son los mapas de riesgo, en ellos se representan gráficamente en una base cartográfica, la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, su periodo de retorno e intensidad, así como la manera en que impacta en los sistemas afectables, principalmente caracterizados por la actividad humana (población, vivienda, infraestructura y agricultura) [15].

2) Sistemas de medición y monitoreo

Los sistemas que se usan para la medición y el monitoreo de fenómenos se basan en conocimientos científicos orientados a la elaboración de pronósticos y/o predicciones. Son necesarios sistemas que realicen un monitoreo continuo (24 horas) de las diferentes variables que necesitan ser supervisadas [16].

Los diferentes fenómenos hacen diversa la forma de realizar un monitoreo. Las amenazas climáticas de implementación lenta como las sequías requieren de un monitoreo constante de las variables que intervienen en este fenómeno. En los fenómenos de implementación rápida como las lluvias y los ciclones, el pronóstico meteorológico es fundamental [17].

3) Difusión de alertas públicas

En los sistemas de alerta temprana, es necesario asegurarse que las alertas lleguen a las personas que pueden estar en riesgo. Los alertamientos deben ser claros, comprensibles y con información útil, de tal forma que permitan responder de manera adecuada. Es necesario que se establezcan mecanismos de comunicación ágiles y perfectamente definidos [16].

4) Planes de respuesta o contingencia

Es necesario que la sociedad sea capaz de entender el riesgo que implica un fenómeno, por lo cual es necesario que sepan cómo reaccionar ante esta situación, por lo cual es necesario educar a las personas, así mismo es necesario crear programas que preparen a la sociedad a responder de manera correcta ante la presencia de un fenómeno. También, es necesario contar con planes y manuales de procedimientos, estos deben de ser practicados y probados para verificar que funcionen de manera eficiente [16].

1.4.1. Niveles de alerta y peligro

Existen instituciones que se encargan de evaluar la información referente a los mapas de riesgos, de esta manera determinan el daño potencial, el nivel y el tipo de alerta que debe de ser declarado y emitido. Generalmente se utiliza un semáforo o niveles asociado a tres colores. Cada color cuenta con un significado y con acciones definidas [18]:

1. **Verde:** indica que se debe verificar el comportamiento y la evolución del fenómeno o evento monitoreado, así como de las alertas que se continúen emitiendo. Esta alerta debe dirigirse a los especialistas de las instituciones, los encargados del plan de emergencia y los habitantes de las comunidades en peligro.
2. **Amarillo:** indica el aumento de la alerta y los diferentes equipos e instituciones inician sus preparativos para ejecutar las acciones correspondientes al fenómeno que se está presentando.
3. **Rojo:** indica la eminente llegada o materialización del fenómeno, esta alerta se emite a través de las instituciones responsables o entidades autorizadas, tanto nacionales como locales. En este estado, se activan los planes de emergencia y en la mayoría de los casos, se ordena una evacuación de la población que podría verse afectada a zonas seguras o albergues, además se inician otras acciones según las condiciones en las que se presenta el fenómeno.

1.4.2. Sistemas SAT de monitoreo atmosférico

Entre las amenazas o eventos más comunes a los cuales se aplican un SAT en América Latina, son: inundaciones, deslizamientos de tierra, huracanes, volcanes, sismos, tsunamis, incendios forestales, fenómeno del niño y la niña [19]. México ha implementado servicios y sistemas de alerta con el fin de encontrar instrumentos, procesos, métodos y técnicas que permitan hacer un pronóstico para mitigar el impacto que tienen los fenómenos en la población, ecosistema y el medio ambiente, (Figura 3) [19].

Sistema	Fenómeno	Información	Cobertura	Fecha de inicio	Momento de aviso
Servicio Sismológico Nacional	Sísmico	www.ssn.unam.mx	Nacional	1910	Aviso de terremoto
Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX)	Sísmico	www.cires.org.mx	Ciudad de México, Oaxaca, Chilpancingo, Acapulco y Morelia	1991	Segundos previos al arribo de un sismo que ya ocurrió. Depende de la distancia del epicentro y la energía del sismo
Sistema de monitoreo del volcán Popocatepetl	Volcánico	www.gob.mx/cenapred	Zonas aledañas al volcán	1994	Si ocurre un evento
Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT)	Ciclón Tropical	smn.cna.gob.mx www.gob.mx/cenapred	Nacional	2000	Con 72 horas de anticipación
Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis	Tsunami	www.bit.ly/lw3MNJa	Costa del Pacífico mexicano	2013	Para tsunamis locales, minutos de anticipación; para los regionales y lejanos o transoceánicos, horas
Sistema de Alerta Temprana de Incendios en México	Incendios forestales	www.gob.mx/conabio	Nacional	1999	Si ocurre algún incendio
Servicio Meteorológico Nacional	Meteorológicos	smn.cna.gob.mx	Nacional	1877	Aviso si ocurre algún evento y pronósticos

Figura 3. Servicios y Sistemas de Alerta en México [19]

Sistema Canadiense y los incendios forestales en México

México ha adoptado el Sistema Canadiense para estimación de peligro de incendio. Este sistema está conformado por cuatro subsistemas: 1) índice de peligro meteorológico de peligro de incendios, 2) de predicción del comportamiento del incendio, 3) de predicción de ocurrencia en el que se integran los datos históricos, además de los meteorológicos, 4) que completa factores como la humedad de los combustibles vivos, el paisaje, entre otros (Figura 4) [20].

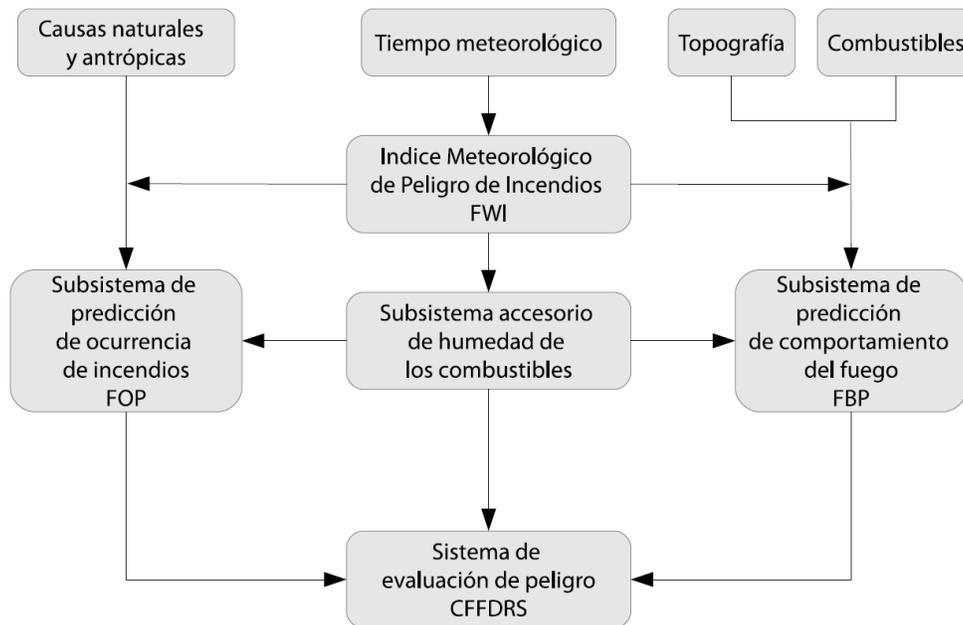


Figura 4. Estructura del Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales [20]

1.5. Monitoreo atmosférico en México

El antecedente del monitoreo de la calidad del aire en la Ciudad de México por instituciones de gobierno data de agosto de 1967, con la puesta en servicio de la Red Panamericana de Muestreo Normalizado que operó en todo el territorio nacional, dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se instalaron cuatro estaciones manuales para determinar polvo sedimentable y su acidez [21].

En 1973 se inicia la transformación del sistema de mediciones manuales por mediciones automáticas continuas y en tiempo real, con recepción de datos en una base de control central. La instalación concluyó en 1974 y se denominó Red Computarizada Automática de Monitoreo Atmosférico. Las estaciones podían medir las concentraciones de los contaminantes, criterios y parámetros meteorológicos de dirección y velocidad del viento, temperatura ambiente y humedad relativa. Este sistema operó hasta el año de 1980, fecha en que las autoridades decidieron reemplazarlo.

En el año de 1984 comenzó la integración de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la ZMVM, que quedó terminada e inició su operación en octubre de 1986. A partir de esta fecha se tiene una base de datos continua y confiable. En particular datos y registro de incendios forestales, sequías y contaminación del aire [21].

1.5.1. Detección y Seguimiento de Incendios Forestales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

El Servicio Meteorológico Nacional incursionó desde 1998 en la detección y seguimiento de los incendios forestales en México a través de imágenes del satélite GOES-12. El SMN usa un sistema Hazard Mapping System (HMS) para el monitoreo de focos de calor. Este es un sistema de procesamiento interactivo de detección de focos de calor a través de la observación de un analista, este se encuentra en las instalaciones del SMN en México. La detección de focos de calor se realiza de forma manual a partir de las 08:00 hrs hasta las 18:00 hrs todos los días y de manera automática las 24 horas del día los 365 días del año. También se utilizan mapas de Peligro y el sistema McIDAS (Man computer Interactive Data Access System), mediante el despliegue y procesamiento de datos satelitales de la NASA, NOAA y la Universidad de Wisconsin (Figura 5) [22].

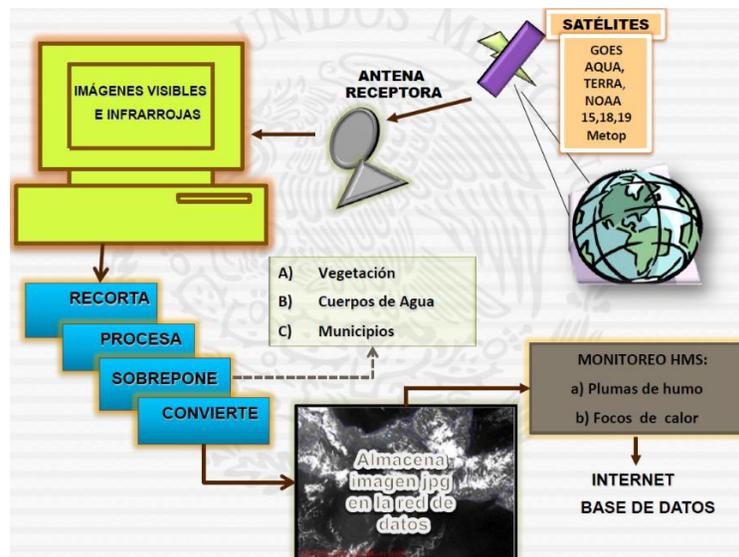


Figura 5. Diagrama de procesamiento general de imágenes satelitales para su observación del SMN [22]

Los datos procesados provienen de los satélites:

- AQUA y TERRA a través del sensor MODIS de la NASA
MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer por sus siglas en inglés) es un instrumento que se encuentra a bordo de los satélites Terra y Aqua. Este mide los límites y propiedades de tierra, nubes y aerosoles, el color del océano, fitoplancton y biogeoquímica, el vapor de agua atmosférico y la temperatura de la superficie terrestre y las nubes [23].

- NOAA 15, NOAA 18, NOAA19 y METOP a través de AVHRR: AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer por sus siglas en inglés) es un instrumento que se encuentra a bordo de los satélites NOAA 15, NOAA 18, NOAA19 y METOP. Proporciona datos en diferentes intervalos dentro del rango visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico del espectro electromagnético. Los canales correspondientes al visible y el infrarrojo cercano permiten observar vegetación, nubes, lagos, costas, nieve y hielo. El canal de infrarrojo térmico permite obtener la temperatura de la Tierra, temperatura de la superficie del agua y las nubes. [24].
- GOES a través del canal 2 IR reflectivo y visible para humos: GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite por sus siglas en inglés) es un satélite encargado de las observaciones visibles e infrarrojas de fenómenos meteorológicos, la atmósfera, huracanes y tormentas fuertes. También es capaz de obtener datos sobre el campo magnético terrestre y la radiación X del sol [25].

1.5.2. Sistema de alerta temprana de incendios de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)

La CONABIO cuenta con un sistema que genera información en forma operacional para la atención de incendios forestales, usando datos satelitales como insumo principal. La alerta temprana está conformada por el peligro de propagación basado exclusivamente en las condiciones de la vegetación, usando dos productos derivados de información satelital: el índice de anomalía de la vegetación (que evalúa el combustible vivo) y un modelo de humedad del combustible muerto, una vez que se presenta un fuego (puntos de calor) [26].

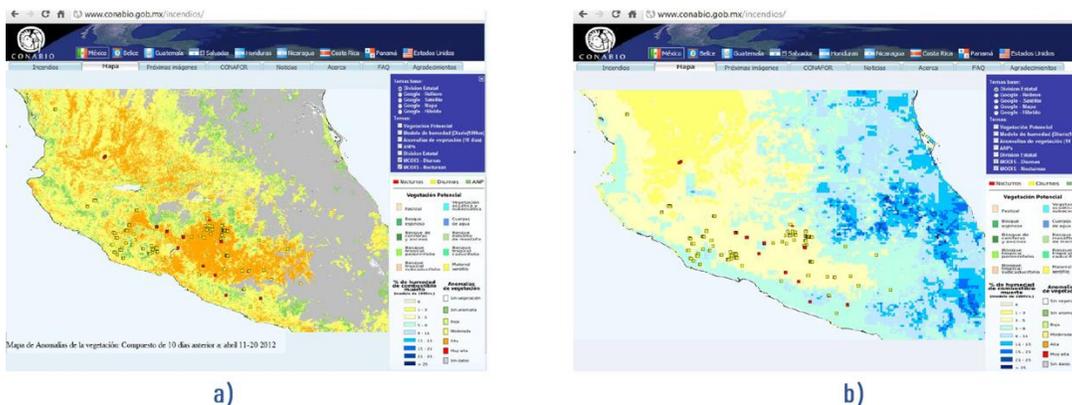


Figura 6. a) Índice de anomalía de la vegetación, b) Modelo de humedad de combustible [26]

El índice de anomalías de la vegetación es el resultado de la comparación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) actual con un NDVI estimado para la misma fecha, con base al comportamiento histórico del NDVI calculado con la técnica de análisis armónico de serie de tiempo (HANTS por sus siglas en inglés Harmonic Analysis Time Series), considerando diez años de información satelital [26].

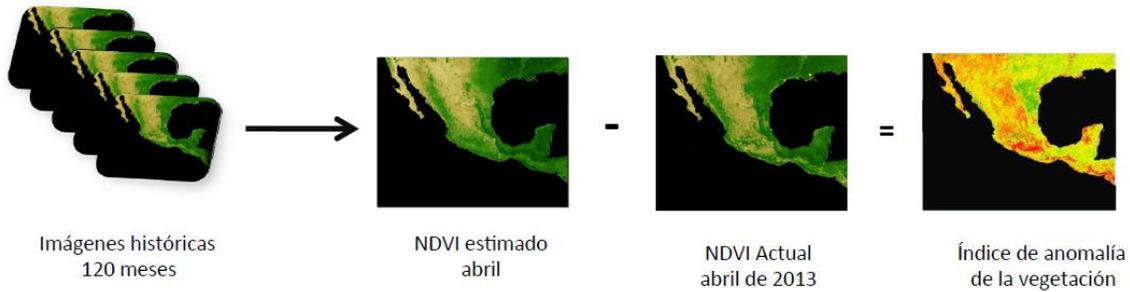


Figura 7. El índice de anomalías de la vegetación [26]

El modelo Cene la finalidad de calcular la humedad del combustible muerto depositado en la superficie. Para ello se modela el flujo de humedad de un día a otro con base a las condiciones atmosféricas, utilizando las siguientes variables:

- Tiempo de duración de las precipitaciones
- Humedad atmosférica relativa
- Temperatura superficial del suelo
- Estimación de la humedad del combustible del día anterior
- Tipo de combustibles por humedad [26]

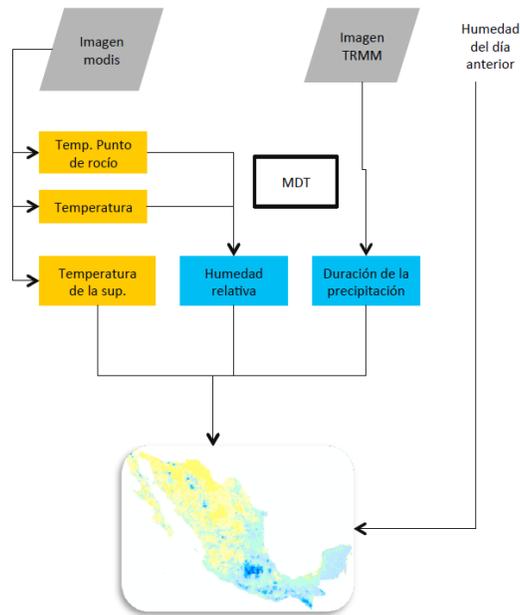


Figura 8. Modelo de humedad de combustible [26]

El sistema de alerta temprana de la CONABIO realiza la detección de puntos de calor a partir de imágenes de satélites diaria, y la caracterización del sitio. La información se envía por correo electrónico y se publica en la página web de la CONABIO [26].

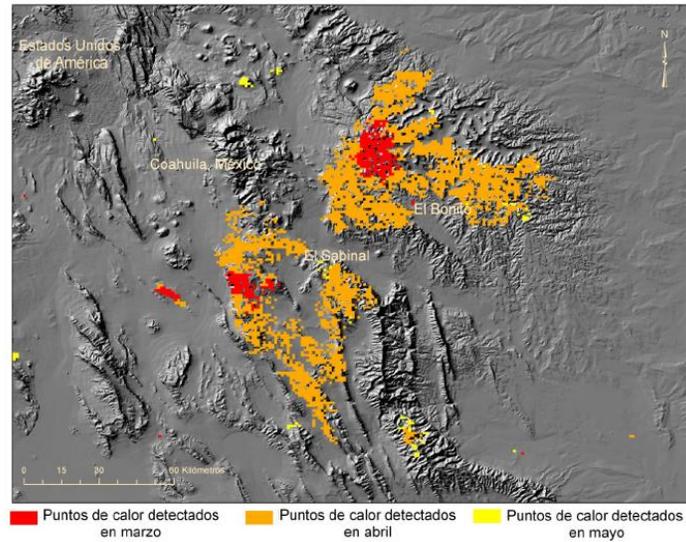


Figura 9. Mapa de puntos de calor [26]

2. CASO DE ESTUDIO: RESERVA ECOLOGÍA DEL PEDREGAL DE SAN ÁNGEL

La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) es una reserva natural protegida por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) desde 1983. Esta reserva protegida abarca en la actualidad 237.3 hectáreas, lo cual representa el 33% de Ciudad Universitaria. Su concentración se distribuye hacia la parte sur del campus, siendo dividida por la avenida de los Insurgentes y embebida como un encaje basáltico entre centros, institutos, facultades y áreas de servicio. La REPSA representa para la cuenca de México, el último relicto conservado del ecosistema conocido como matorral xerófilo y nombrado desde la conquista como malpaís [27].

La REPSA es una reserva ecológica de carácter urbano particular debido a su biodiversidad, geomorfología de gran valor paisajístico y protegida por una universidad, esto garantiza su conocimiento ejemplar a través de las numerosas instituciones dedicadas a la investigación y divulgación científica [27].

La REPSA de Ciudad Universitaria, cuenta con una vegetación tipo matorral xerófilo única en el país por su estructura y composición biótica, se asienta sobre un sustrato rocoso basáltico originado hace 2000 años por los derrames del volcán Xitle y de conos adyacentes. La actividad volcánica ocasionó una alta heterogeneidad geomorfológica. La extensión original del derrame fue de 80 kilómetros cuadrados, de los cuales 2.37 fueron decretados como Reserva Ecológica en 1983 [27]. En esta zona domina un estrato herbáceo, arbustivo, además se encuentran elementos arbóreos de menos de siete metros de altura. Esta zona importante de biodiversidad, que actualmente solo abarca un área de 237 hectáreas, también ha sido catalogada como una zona de alto riesgo de incendios (principalmente la zona núcleo sur oriente) [27].

El ecosistema del pedregal de San Ángel, al sur de la ciudad de México es considerado como una de las zonas de mayor riqueza florística de toda la cuenca de México, ya que se han registrado 337 especies de plantas vasculares, 148 de aves, 34 de mamíferos, 23 de reptiles y 7 de anfibios [27].



Figura 10. Fotografía aérea que muestra el área que ocupó el Pedregal de San Ángel [27]

2.1. Zonificación de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel

La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel cuenta con tres zonas núcleo, zona núcleo poniente, zona núcleo oriente y zona núcleo sur oriente; el total de la superficie que cubren estas áreas es de 171 hectáreas [27].

Adicionalmente, cuenta con 13 zonas de amortiguamiento, éstas han sido nombradas como circuito exterior, porción norte (A1); circuito exterior, porción sur (A2); cantera oriente (A3); senda ecológica (A4); paseo de las esculturas (A5); centro cultural (A6); biomédicas (A7); biológicas (A8); estadio de prácticas (A9); jardín botánico (A10); vivero alto (A11); espacio escultórico (A12) y zona administrativa exterior (A13). el total de la superficie que cubren estas áreas es de 66 hectáreas [27].



Figura 11. Fotografía aérea que muestra las zonas núcleo y zonas de amortiguamiento de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel [27]

2.2. Prevención y combate de incendios forestales en la REPSA

En la REPSA se han implementado acciones pertinentes para minimizar los daños que un incendio forestal pudiera causar. Estas acciones se llevan a cabo por las instancias encargadas de la reserva, principalmente la Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal en coordinación con la Dirección General de Servicios Generales que coordina a Protección Civil UNAM, Bomberos UNAM y Auxilio UNAM [27].

En la prevención y combate de incendios forestales, se considera en primer la detección de áreas de riesgo, ya que es imprescindible contar con la información de cuales zonas de la reserva son más vulnerables, estas áreas son consideradas como prioritarias, y es en donde se implementan las medidas de prevención pertinentes [27].

Para categorizar los tipos de riesgos que pueden presentarse en la Reserva, se ha utilizado el esquema conocido como Semáforo de Karl Lewinsking, el cual incluye distintas acciones preventivas (Figura 12) [27].

Descripción	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo alto	Riesgo muy alto
Temperatura	Hasta 25 °C	Hasta 30 °C	De 30 °C a 36 °C	Arriba de 36 °C
Humedad relativa	Hasta 50%	Hasta 40%	Menos del 20%	Abajo del 10%
Velocidad del viento	0 a 10 km/h	10 a 20 km/h	Arriba de 20 km/h	Más de 30 km/h
Vegetación (combustible)	Semi-húmeda	Seca	Seca o muy seca	Muy seca
Cielo	Nublado	Nublado a medio nublado	Soleado a medio nublado	Soleado
Estatus	Favorable	Pre-alerta	Alerta	Alarma
Semáforo	Verde	Ámbar	Rojo	Situación crítica roja
Acciones	Monitoreos normales	Monitoreos y medidas de detección constantes	Monitoreo intenso y detección constante en todas las áreas críticas	Monitoreo y comunicación constante con servicios de emergencia
	Vigilancia de rutina	Vigilancia permanente	Vigilancia permanente	Vigilancia extrema
	Prevención de RUTINA	Prevención CONSTANTE	Prevención URGENTE	Prevención MEDIDAS EXTREMAS

Figura 12. Semáforo de Karl Lewinsking [27]

En la determinación de las zonas de riesgo, se toman en cuenta la cantidad de incendios ocurridos y su reincidencia, la afluencia de personas, el acceso poco controlado, las actividades realizadas por indigentes y los sitios en donde se acumula basura. La senda ecológica del Universum y el espacio escultórico que se encuentra junto a la zona núcleo sur oriente de la reserva son zonas catalogadas como de alto riesgo de incendios forestales [27].

Se ha observado que la mayor incidencia de incendios se registra en los meses de enero-mayo. Los grandes factores que condicionan la ocurrencia de incendios son: acumulación de combustible, las condiciones meteorológicas y los descuidos humanos, cabe mencionar que la fragmentación y la reducción del pedregal, causan

un aumento en la frecuencia de los incendios ya que lo hacen susceptibles a que se presenten especies exóticas pirófilas como lo son los árboles de eucalipto y el pasto kikuyo. Sin embargo, el papel de detonación a los incendios es la negligencia humana. En los últimos 11 años, en la zona de los Pedregales-Ajusco se han registrado 164 incendios que suman 31.8 hectáreas. Algunos de los factores principales a los que se les atribuye el desencadenamiento son los naturales: acumulación de combustible vegetal, temperatura, humedad, velocidad del viento, actividades humanas (intencionalmente, negligencia y accidentalmente) [28].

El Pedregal de San Ángel es un ecosistema donde se acumula una gran cantidad de combustible en forma de materia vegetal muerta y a pesar del gran número de incendios que ocurren dentro de la zona, existen pocos estudios acerca del origen y efecto del fuego sobre la comunidad biótica. Se ha observado que los incendios se producen en la temporada más seca del año, cuando muchas especies de plantas se encuentran en estado latente como bulbos, tubérculos, meristemos y semillas; gran cantidad de materia orgánica seca se encuentra almacenada en el mantillo, que en esas fechas alberga en promedio un kilogramo y medio de materia muerta por metro cuadrado. Los registros históricos para esta zona son: 455 incendios entre 1992 y 1997, 141 incendios entre el 2000 y el 2011, sumando 13.9ha y 13 entre el 2004 y el 2012, los cuales están georreferenciados sumando 16.53ha (Figura 13) [28].

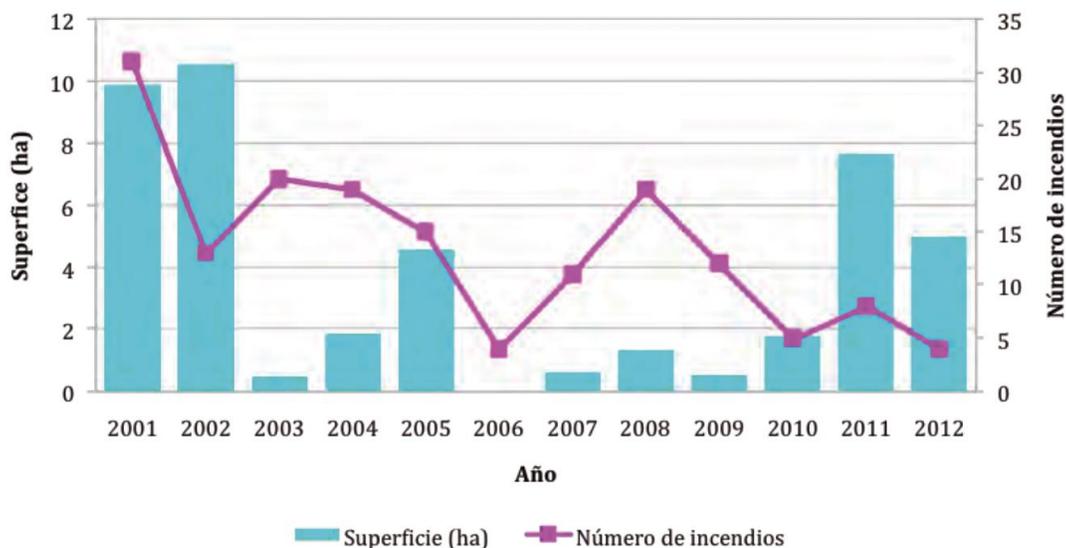


Figura 13. Registro de 11 años. Incendios y superficie afectada [28]

En el pedregal los incendios que se pueden presentar son superficiales y subterráneos, estos producen cambios en los rasgos físicos y químicos del

ambiente. El contenido de muchos nutrientes presentes aumenta por la liberación de cenizas que se presenta durante la combustión, sin embargo, cuando se presentan temperaturas muy elevadas, el nitrógeno y la materia orgánica se volatilizan [28].

Otro cambio que un incendio puede ocasionar es el cambio en la acidez del suelo, de tal manera que puede transformar de alcalino a ácido; además, al quemarse la cubierta vegetal existente, se propicia una mayor incidencia de la radiación solar, esto ocasiona un drástico incremento de temperatura a nivel de suelo, aumentando la velocidad del viento y la humedad tiende a disminuir [28].

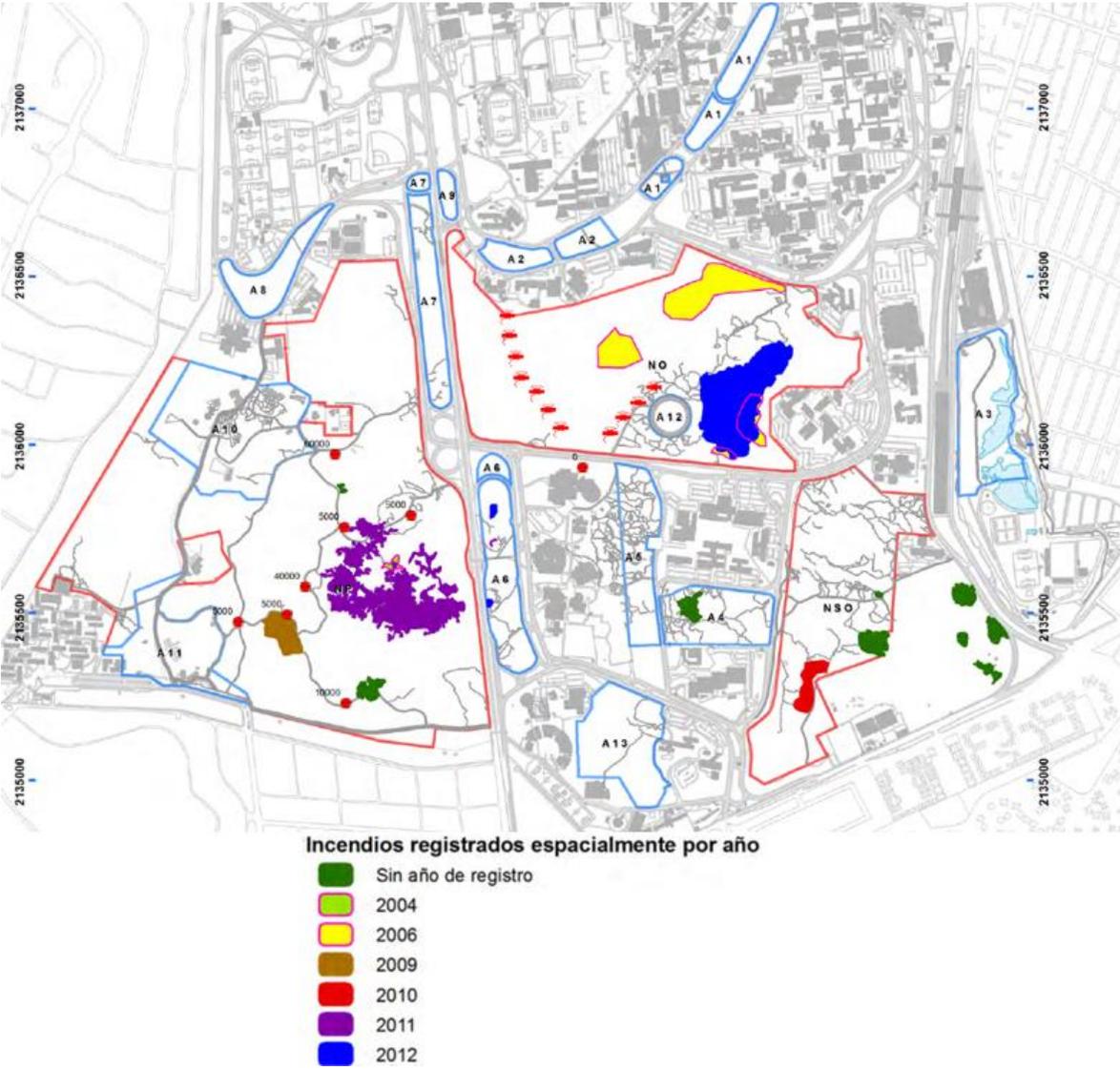


Figura 14. Mapa de incendios forestales registrados en la REPSA [28]

Actualmente el personal entrenado y con el equipamiento para enfrentar los incendios forestales es H. Cuerpo de Bomberos de la UNAM. Al momento de recibir una alarma, se procede de acuerdo con el siguiente organigrama (Figura 15).

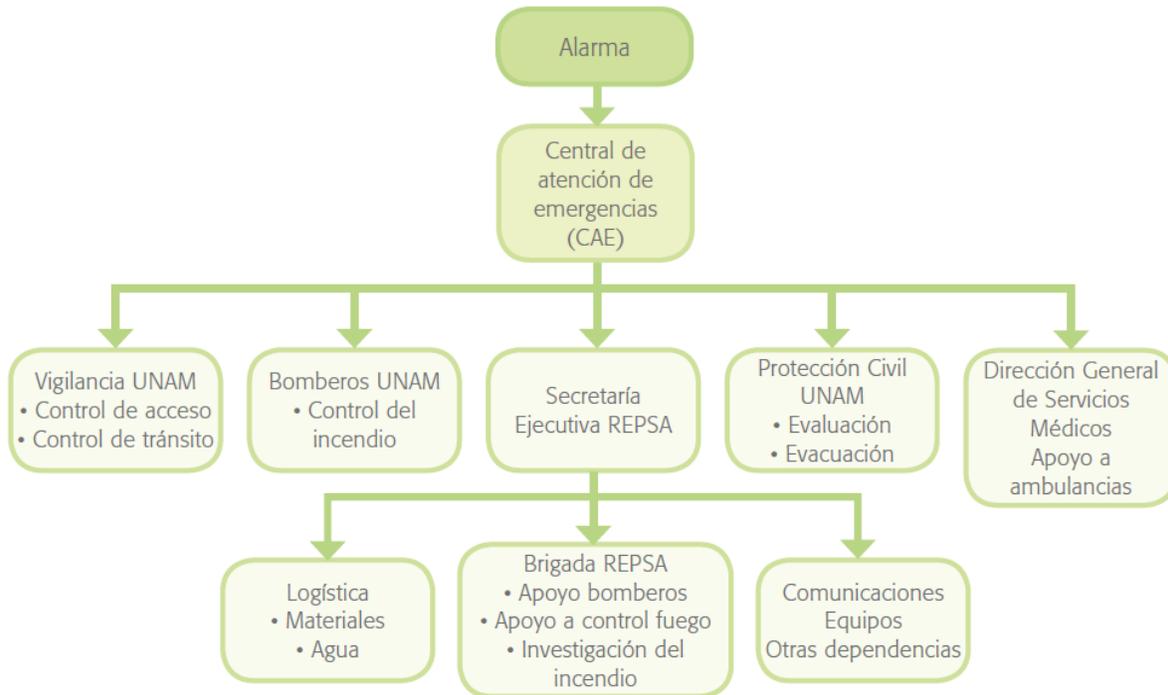


Figura 15. Procedimiento ante alerta de incendio forestal

2.3. Especies introducidas en el pedregal

El pedregal cuenta con una gran variedad de vegetación nativa. Pero a lo largo de la historia de la urbanización alrededor de este sitio de preservación de flora y fauna, se han introducido de manera voluntaria y no voluntaria, especies no nativas, dos de estas que aparentemente están causando un gran impacto por invasión, por humedad, entre otros son considerados el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y el árbol de eucalipto (*Eucalyptus resinifera*) (Figura 16); considerando que la plantación excesiva de este, genera el riesgo latente de incendios durante la época de sequía, ya que esta vegetación se convierte en una masa de material combustible. En la (Figura 16) se muestra la ubicación del pasto kikuyo en la zona protegida del pedregal. Aparentemente este tipo de vegetación mayormente solo rodea la zona [28].

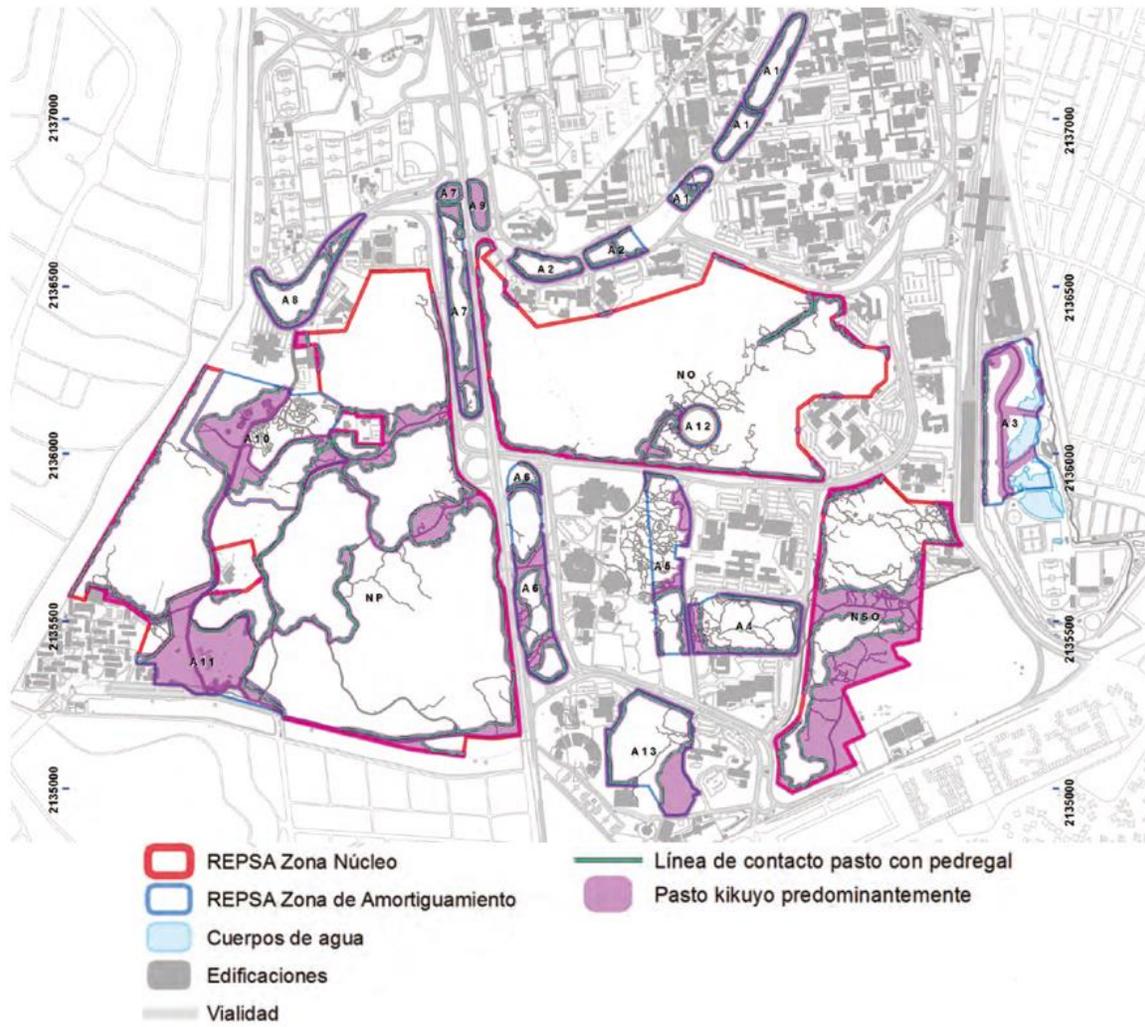


Figura 16. Ubicación de pasto kikuyo en la REPSA [28]

3. INSTRUMENTACIÓN Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN CIUDAD UNIVERSITARIA

3.1. Definición de estación meteorológica

Una estación meteorológica es un sistema integral instrumental que cuenta con dispositivos eléctricos-electrónicos y sensores, su principal función es la captura y registro de datos, como la temperatura, humedad, radiación solar, dirección y velocidad del viento, lluvia, presión atmosférica, entre otras (Figura 17); estas estaciones pueden ser automáticas o no; su registro, además, puede ser en tiempo real; éstas se conectan al sistema lectura de las señales (Datalogger) y cuentan con un sistema de transmisión y de registro de datos. [29], [30], [31].

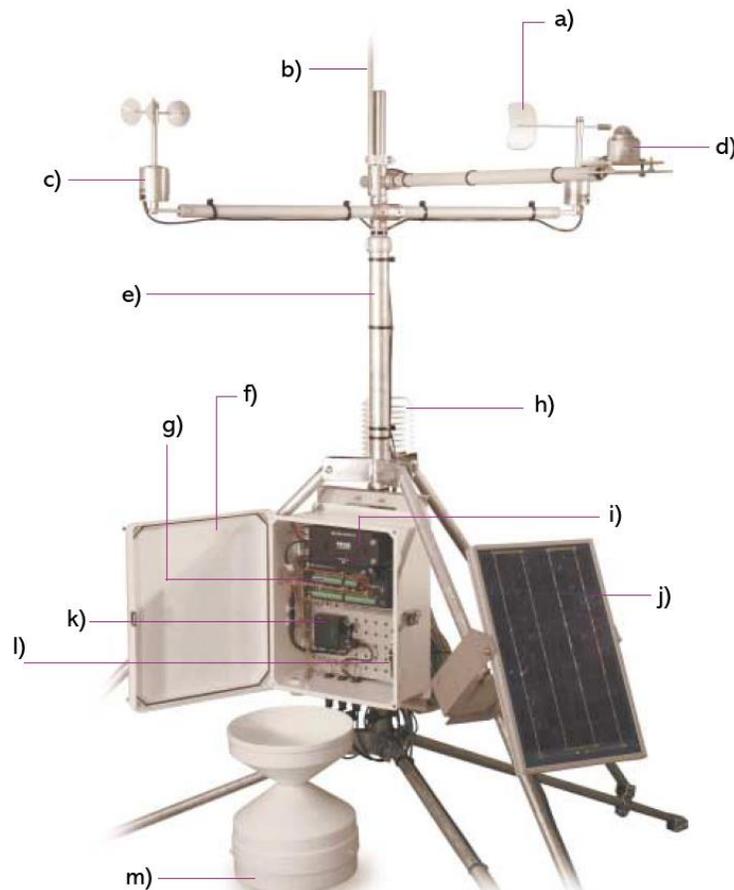


Figura 17. Estación Meteorológica: **a)** Veleta, **b)** Varilla descargas, **c)** Anemómetro, **d)** Piranómetro, **e)** Trípode, **f)** Caja estanca, **g)** Datalogger CR10X, **h)** Sensor temperatura y humedad relativa, **i)** Fuente alimentación, **j)** Panel Solar, **k)** MODEM GSM, **l)** Interfaz RS232, **m)** Pluviómetro cazoletas. [30]

3.2. Red de estaciones meteorológicas

Cuando un conjunto de estaciones meteorológicas es distribuido en puntos estratégicos a lo largo de una región, se conoce como red. Esta se encarga de monitorear y registrar de forma continua las variables atmosféricas. Los datos que son recabados por las estaciones son enviados a una base central para ser almacenados, procesados e interpretados para su posterior análisis [29].

3.3. Estaciones automáticas y no automáticas

Las estaciones no automáticas son aquellas que necesitan de una supervisión al momento de la toma de datos de las variables con las que se trabajan. Además, el observador también tiene como tarea el registrarlos en una base de datos para su posterior análisis [31].

Las estaciones meteorológicas automáticas son un sistema en el que los instrumentos efectúan, transmiten y registran sin necesidad de personal las observaciones de las variables meteorológicas que se implementarán en el sistema [31]. Estas mejoran la normalización de la información que se recolecta, se minimizan los problemas de subjetividad del observador y los errores de digitación.

Las estaciones meteorológicas automáticas sirven para poder complementar la red básica de observaciones que se realizan de manera manual [31].

3.4. Tipos de estaciones meteorológicas

Digital: este tipo de estación meteorológica mide y registra variables como la humedad, temperatura, presión atmosférica y velocidad del aire, con el objetivo de determinar las condiciones actuales. Se caracteriza por contar con instrumentos y sensores de tipo digital [32].



Figura 18. Estación meteorológica digital TFA 35.1140 [33]

Analógico: este tipo de estación mide y registra variables como la humedad, temperatura, presión atmosférica y velocidad del aire. Se caracteriza por el uso de

instrumentos y sensores que indican la medición de las variables mediante esferas de agujas y escalas graduadas [32].



Figura 19. Estación meteorológica analógica TFA 20.2038 [34]

Portátil: este tipo de estación ha sido diseñada para ser transportable, además puede trabajar con baterías o energía solar. Puede tomar datos de variables como la velocidad del viento, temperatura, humedad y presión atmosférica [32].



Figura 20. Estaciones meteorológicas portátiles [35]

Doméstica: este tipo de estación es de uso doméstico, su función principal es registrar variables como la temperatura y la humedad, esto con el objetivo de determinar las condiciones actuales dentro de hogares y oficinas [32].



Figura 21. Estación meteorológica doméstica excelvan [36]

Pluviométrica: este tipo de estación cuenta con un dispositivo que mide la cantidad de precipitaciones de lluvia o nieve caída entre dos mediciones consecutivas [32].



Figura 22. Estación meteorológica pluviométrica MetPak RG [37]

Evaporimétrica: este tipo de estación mide la evaporación efectiva haciendo uso de instrumentos tales como tanque evaporimétrico, pluviómetro, anemómetro y termómetro de máximas y mínimas [32].

3.5. Requerimientos de las estaciones meteorológicas automáticas

En la (Tabla 7) se muestran los requerimientos de una estación automática.

Tabla 7. Requisitos de exactitud para una estación automática [31]

Elemento	Requisito de exactitud establecido
Presión atmosférica	± 0.1 hPa sobre tierra ± 0.1 hPa sobre mar
Dirección del viento	$\pm 20^\circ$
Rapidez del viento	± 2 m/s por debajo de 20 m/s $\pm 10\%$ por arriba de 20 m/s
Temperatura del aire	± 0.2 °C
Precipitación	± 0.5 mm por debajo de 5 mm $\pm 10\%$ por arriba de 5 mm

En este tipo de estaciones automáticas las lecturas de las variables se hacen cada diez segundos.

3.6. Red de estaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

El INIFAP (Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias) realiza tareas de decisión en la agricultura que requiere de información meteorológica actualizada que permita orientar los procesos de producción, para ello, cuenta con estaciones meteorológicas digitales que miden la temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento (Figura 23) [29].

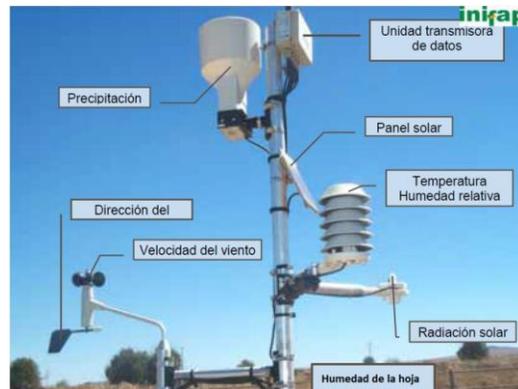


Figura 23. Estación meteorológica de la INIFAP [29]

La medición de las condiciones atmosféricas se realiza cada 15 minutos, los datos se transmiten a una base central localizada en el Laboratorio Nacional de Modelaje y sensores remotos ubicado en el campo experimental pabellón en el estado de Aguascalientes. A febrero del 2008, la red integra 667 estaciones en todo el país, distribuidas en 28 redes estatales de estaciones automatizadas [29].

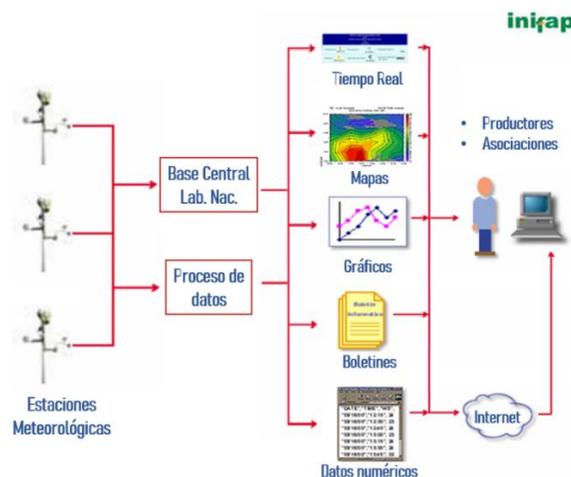


Figura 24. Proceso de los datos climatológicos para su presentación en Internet [29].

3.7. Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario

El programa de estaciones meteorológicas del bachillerato universitario (PEMBU) está constituido por una red de estaciones meteorológicas que recaba datos de variables atmosféricas tales como temperatura exterior e interior, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, cantidad de precipitación y humedad, los cuales permiten enriquecer la información de las condiciones meteorológicas del Distrito Federal y área metropolitana de la Ciudad de México, uniéndose así a la información del Servicio del Observatorio Meteorológico Nacional (SMN), de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), entre otros [38].

El PEMBU está constituido por estaciones meteorológicas ubicadas en los 9 planteles de la Escuela Nacional Preparatoria (ENP), en los 5 planteles del Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH) y en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) en Ciudad Universitaria, estas estaciones están equipadas con instrumentos de la marca Davis Vantage Pro[38] [39]. Los períodos de registro de las estaciones van del año 1992 hasta el presente, las bases de datos se organizan en datos recientes y datos históricos [39].

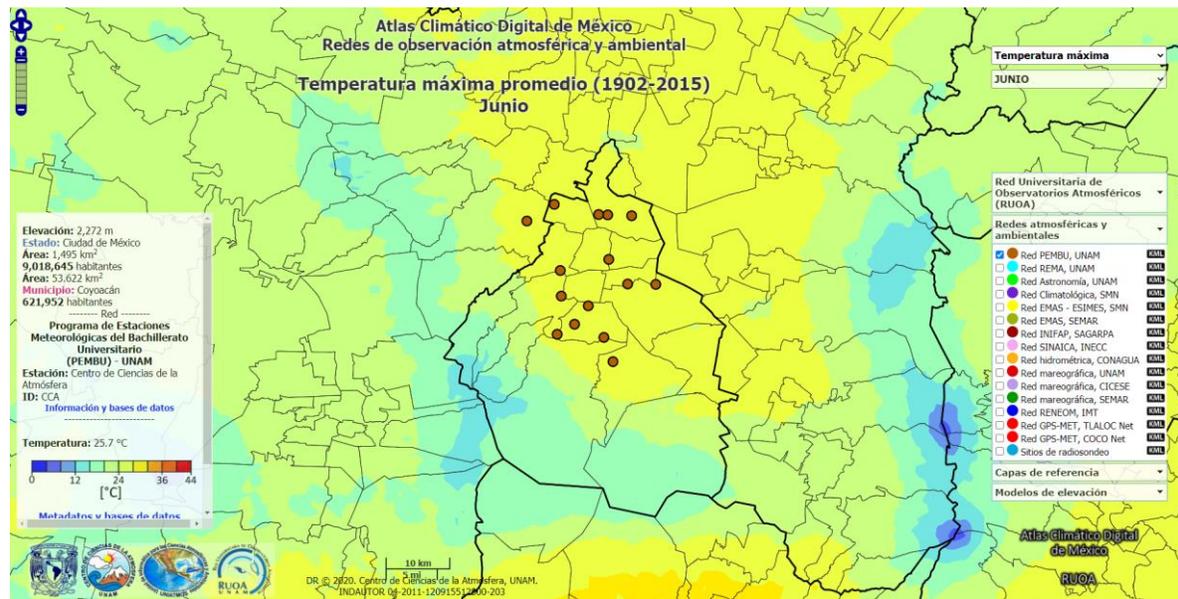


Figura 25. Distribución geográfica de las estaciones del Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario de la UNAM [40]

Las variables atmosféricas que son capturadas por la red de estaciones PEMBU son las siguientes:

- Fecha de captura de los datos
- Hora de la captura Temperatura ambiente en [°C]
- Temperatura ambiente máxima registrada en el período en [°C]
- Temperatura ambiente mínima registrada en el período en [°C]
- Humedad relativa ambiente en [%]
- Punto de rocío, indicador del vapor de agua contenido en el momento
- Velocidad del viento dada en metros/ segundo
- Dirección del viento está registrada en grados: de 0° a 360°
- Medición del “monto” de viento que pasa por la estación durante un período de tiempo dado y se expresa en kilómetros de viento
- Racha o velocidad de viento más alta registrada en el período
- Dirección de viento predominante durante el período
- Sensación térmica
- Índice de calor
- Índice Temperatura - Humedad - Viento
- Índice Temperatura - Humedad - Sol - Viento
- Presión atmosférica
- Cantidad de lluvia, en milímetros
- Intensidad de la lluvia, dada en mm/hora
- Cantidad de radiación solar, expresado en Watts/m²
- Energía solar, es el monto de la energía de la radiación solar acumulada en un periodo de tiempo y se expresa en Langleys o 11.622 Watts/hora/m²
- Índice de la radiación ultravioleta
- Dosis de radiación ultravioleta
- Radiación UV máxima alcanzada en el período
- Monto de calor requerido para conservar una estructura confortable para su ocupación
- Cooling Degree-Days, es el monto de enfriamiento requerido para conservar una estructura confortable para su ocupación
- Temperatura en el interior, donde se encuentra ubicada la consola
- Humedad en el interior, donde se encuentra ubicada la consola
- Punto de rocío en el interior, donde se encuentra ubicada la consola
- Índice de calor en el interior, donde se encuentra ubicada la consola
- Evapotranspiración [39]

3.8. Monitoreo atmosférico en el ICAT

Uno de los objetivos principales de la Red de Monitoreo de la Reserva del Pedregal de San Ángel es mitigar el impacto por incendio forestal en el ecosistema único en la Ciudad de México, así como el ambiental en los alrededores de esta zona, en particular el atmosférico. El Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología ICAT, es uno de los participantes de esta red. Esta institución actualmente cuenta con una estación meteorológica, esta está dividida por sensores meteorológicos, cerebro del sistema y sistema de energía (modelo Vantage ProPlus, desarrollada por la empresa Davis instruments), y es supervisada por el departamento de sistemas inteligentes.

3.8.1. Descripción de la estación ICAT

I. La estación está integrada por un sistema de sensores meteorológicos (Figura 26) [41]:

- Termohigrómetro: mide temperaturas desde -40° a 65°C y humedad relativa desde 0 a $100\%RH$,
- Anemómetro: puede tomar mediciones de la velocidad del viento desde 1 a 80 m/s ,
- Pluviómetro: puede leer cantidades de precipitación en incrementos de 0.01" o 0.254 mm .
- Piranómetro: mide la radiación solar global desde 0 a $1,800 W/m^2$
- Sensor de radiación ultravioleta: calcula el índice ultravioleta desde el nivel 0 al 16; el índice de dosis, así como la dosis diaria y acumulada.
- Barómetro: mide la presión atmosférica desde 540 a 1,100 milibares.



Figura 26. Sensores: a) Termohigrómetro, b) Anemómetro, c) Barómetro, d) Pluviómetro, e) Piranómetro, f) Sensor de radiación ultravioleta [41]

II. El cerebro de la estación se compone de una consola y de un adquisidor de datos (Figura 27). La consola muestra y registra los datos meteorológicos, proporciona gráficos y funciones de alarma, se conecta a la computadora utilizando el software WeatherLink, desarrollado por la propia compañía. El adquisidor de datos conecta la estación directamente a una computadora por medio del software proporcionando mejores capacidades de monitorización del tiempo. El registrador de datos tiene una capacidad de almacenamiento de hasta 120 días [41].

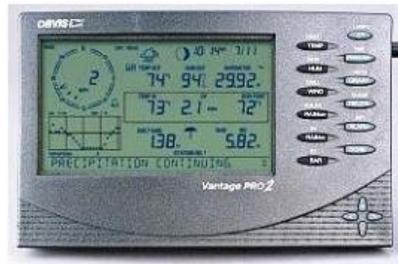


Figura 27. Cerebro de la estación [41]

III. El sistema de energía se encarga de proveer a la estación el voltaje y la corriente necesarios para que la estación meteorológica opere de forma ininterrumpida. Este sistema contempla el acceso remoto por lo que cuenta con un sistema de energía autónomo [41].



Figura 28. Sistema de energía [41]

4. SISTEMAS DIFUSOS COMO HERRAMIENTA PARA EVALUAR EL PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES

4.1. Lógica difusa

La lógica difusa fue creada por el matemático e ingeniero Lotfi A. Zadeh en 1965. Es una disciplina matemática que utiliza expresiones que permiten pasar de un estado, valor o nivel a otro de forma continua. Esta se aplica a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores con vecindades que tienen sus límites extremos. Una aplicación es en los sistemas de control [42]. Esta proporciona un mecanismo de inferencia tal que permite simular los procedimientos de razonamiento humano en sistemas basados en el conocimiento. La teoría de la lógica difusa proporciona un marco matemático que permite modelar la incertidumbre de los procesos cognitivos humanos de forma que pueda ser tratable por una computadora [43].

La lógica difusa emplea valores continuos entre 0 y 1, en donde 0 representa hechos falsos y 1 ciertos. Los conceptos se asocian a conjuntos difusos en donde son relacionados con los valores de pertenencia en un proceso llamado fusificación. Una vez que los valores han sido fusificados, se puede trabajar con reglas lingüísticas para obtener una salida [43].

Un conjunto difuso se define como una colección de elementos que cuentan con un grado de pertenencia definido entre 1 y 0. Sea X una colección de objetos, con un elemento de X denotado por x :

$$X = \{x\}$$

un conjunto difuso puede ser definido de la siguiente manera:

$$A = \{(x, \mu_A(x))\}$$

Donde A representa al conjunto difuso y $\mu_A(x)$ es su función de pertenencia, la cual se define como:

$$\mu_A(x): x \rightarrow [0,1]$$

Donde:

- $\mu_A(x) = 1$ si x se encuentra totalmente en el conjunto difuso A
- $\mu_A(x) = 0$ si x no se encuentra en el conjunto difuso A y
- $0 < \mu_A(x) < 1$ si x se encuentra parcialmente en el conjunto difuso A .

El valor entre 0 y 1 representa el grado de pertenencia de un elemento x al conjunto A [43] [44].

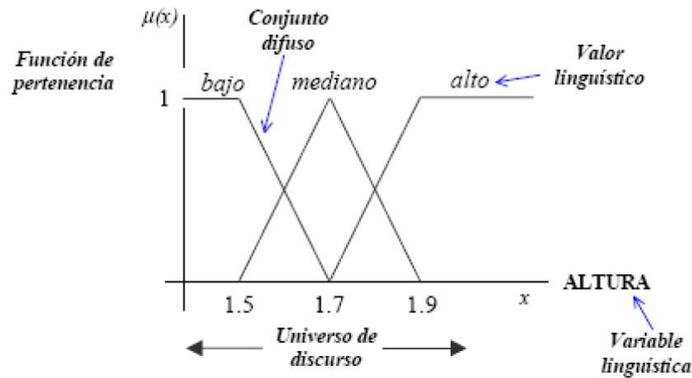


Figura 29. Ejemplo de conjuntos difusos [45]

4.1.1. Variables lingüísticas

Una variable lingüística es aquella cuyos valores son palabras o sentencias que son definidas en un lenguaje natural o artificial, sirven para representar cualquier elemento complejo que no pueda ser descrito en términos numéricos [43].

Una variable lingüística está caracterizada por:

$$(N, T(N), U, G, M)$$

Donde:

- N es el nombre de la variable.
- $T(N)$ es el conjunto de términos de N de los valores o etiquetas lingüísticas.
- U es el universo del discurso o dominio subyacente.
- G es una gramática libre de contexto mediante la que se generan los términos en $T(N)$.
- M es una regla semántica que asocia a cada valor lingüístico de N su significado $M(N)$, donde $M(N)$ denota un subconjunto difuso en U [43].

Los símbolos de las gramáticas incluyen términos primarios como bajo, alto, etc., modificadores como muy, más, menos, etc., y conectores lógicos donde normalmente se utilizan NOT, AND y OR. Un uso habitual de las variables lingüísticas es en reglas difusas [43].

4.1.2. Reglas difusas

Una regla difusa permite crear una relación entre variables mediante el uso de lenguaje natural, esta se expresa como

$$\text{IF}(u = A) \text{ THEN } (v = B)$$

Donde A y B representan a dos conjuntos difusos definidos en los rangos de u y v respectivamente [46].

4.1.3. Estructura de un controlador difuso

La lógica difusa, tiene aplicaciones en la teoría de los sistemas de control, esta permite describir un conjunto de reglas que se utilizarán para manipular un proceso y a partir de ellas generar lo que se conoce como acciones de control [45].

La estructura de un controlador difuso cuenta con 4 elementos: 1) base de conocimiento, 2) fusificación, 3) defusificación y 5) inferencia, esta se muestra en la (Figura 30):

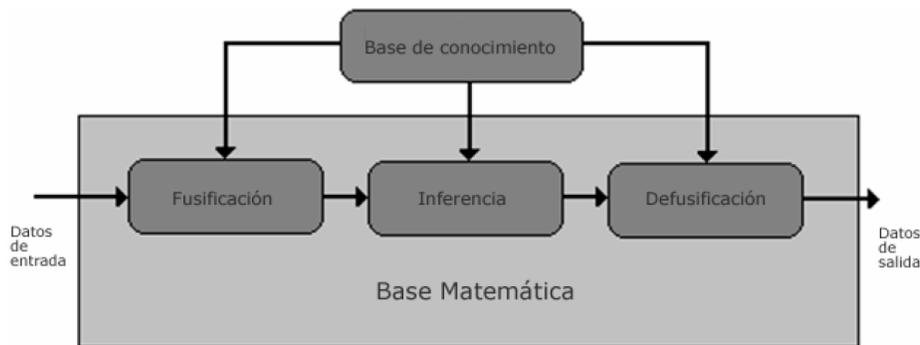


Figura 30. Estructura de un controlador difuso [45]

1) Base de conocimiento

La base de conocimiento contiene la información asociada con el dominio de la aplicación y los objetivos de control. En esta etapa se definen las reglas lingüísticas que decidirán la forma en la que debe actuar el sistema, así como los parámetros de mayor importancia y se establecen las relaciones existentes entre ellos [45] [47].

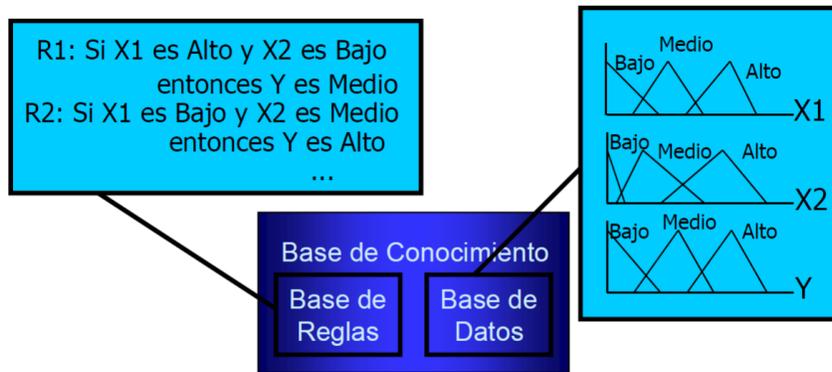


Figura 31. Base de conocimiento de un sistema difuso [47]

2) Fusificación

Tiene como objetivo convertir valores reales en valores difusos. En este proceso se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos que previamente fueron definidos [45], puede ser definido mediante:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1; & x \in A \\ 0; & x \notin A \end{cases}$$

En donde $\mu_A(x)$ representa la función de pertenencia del conjunto difuso A . Es en esta etapa en donde se asigna un valor de 1 si un elemento x pertenece al conjunto de A , y se asigna un valor de 0 en algún otro caso.

La fusificación responde a un conjunto de normas que previamente fueron establecidas y conceptualizadas a partir del conocimiento que brinda el razonamiento humano. Este proceso también se conoce como “borrosificación” [47].

3) Defusificación

Es el proceso inverso de la fusificación, permite asociar a un conjunto difuso un valor numérico. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada, pero esta es expresada en términos difusos, por lo cual, es necesario representarla mediante un número real. Existen diferentes métodos para realizar el proceso de defusificación. Estos usan modelos matemáticos como el método de centroide, el método del promedio ponderado, máximo central, máximo más pequeño, y máximo más grande, los cuales se describen a continuación. [47].

Método de centroide

Este método asocia el centro del área formada por el número difuso, puede ser expresado por:

$$C = \frac{\int_S x \mu_A(x) dx}{\int_S \mu_A(x) dx}$$

Donde $\mu(x)$ representa la función de pertenencia del conjunto de salida, cuya variable es x y S representa el dominio o rango de integración [47].

Método promedio ponderado

Este método toma el promedio de los valores con el máximo grado de pertenencia, puede ser representado por:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{(x_{máx_i} \cdot \mu(x_{máx_i}))}{\sum \mu(x_{máx_i})}$$

Donde:

- n representa el número de máximos,
- $x_{máx_i}$ representa el valor de x del máximo y
- $\mu(x_{máx_i})$ representa el valor de pertenencia del máximo [48].

Máximo Central (MOM, middle of maximum)

La salida es el valor medio de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de pertenencia (Figura 32) [47].

Máximo más pequeño (SOM, smallest of maximum)

La salida es el mínimo valor de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de pertenencia (Figura 32) [47].

Máximo más grande (LOM, largest of maximum)

La salida es el máximo valor de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de pertenencia (Figura 32) [47].

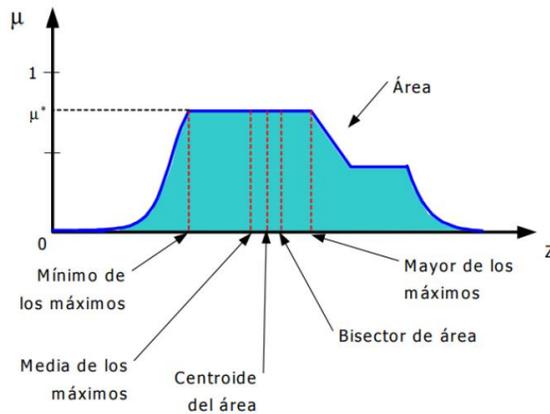


Figura 32. Métodos de defusificación [47]

4) Inferencia

La inferencia interpreta las reglas del tipo if-then con el fin de obtener las conclusiones de las variables lingüísticas de salida, partiendo de los valores de las variables de entrada [47]. Aquí se utiliza la información de la base de conocimiento para generar reglas mediante el uso de condiciones [45]. La inferencia se basa en el paradigma “Modus Ponens Generalizado”, el cual se puede interpretar como la transformación de los grados de cumplimiento del lado izquierdo de las reglas a grados de posibilidad de los lados derechos de las mismas [47].

Existen dos métodos muy utilizados para realizar el proceso de inferencia, el modelo de Mamdani y el de TSK (Takagi, Sugeno y Kang).

Inferencia de Mamdani

El método de Inferencia de Mamdani es el más usado, este se realiza en cuatro pasos:

1. Fusificación de las variables de entrada
2. Evaluación de las reglas
3. Agregación de las salidas de las reglas
4. Defusificación

Este método hace uso de un conjunto de reglas difusas if-then (si-entonces). Si una regla tiene múltiples antecedentes, se utiliza el operador AND u OR para obtener un único número que representa el resultado de la evaluación. Este número es conocido como el valor de verdad [43] [47]. El resultado de la evaluación del valor antecedente se aplica al consecuente, mediante un recorte o escalado según sea el valor de verdad del antecedente. El método que más se usa es el recorte, el cual

corta el consecuente con el valor de verdad del antecedente (Figura 33, a). Por otra parte, el escalado proporciona un valor más preciso, ya que preserva la forma original del conjunto difuso (Figura 33, b). El resultado se obtiene multiplicando todos los valores por el valor de verdad del antecedente [43].

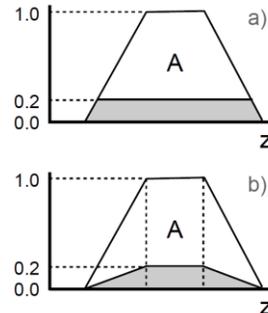


Figura 33. a) Conjunto recortado, b) Conjunto escalado

La agregación de las salidas de las reglas es el proceso en el que se combina todas las funciones de pertenencia de todos los consecuentes previamente recortados o escalados, combinándose para obtener un único conjunto difuso por cada variable de salida [43].

Inferencia de Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

Este método se basa en reglas difusas, sin embargo, no proporciona un conjunto difuso sino una serie de funciones lineales. Este modelo es útil para sistemas complejos y de dimensiones mayores que los que se pueden resolver por el método de Mamdani [47].

Sean A_i y B_i , con $i = 1, 2, \dots, n$, conjuntos difusos de un sistema. Las reglas tendrían la siguiente forma:

$$R_1: \text{Si } x \text{ es } A_1 \wedge y \text{ es } B_1 \text{ entonces } z = f_1(x, y)$$

$$R_2: \text{Si } x \text{ es } A_2 \wedge y \text{ es } B_2 \text{ entonces } z = f_2(x, y)$$

⋮

$$R_n: \text{Si } x \text{ es } A_n \wedge y \text{ es } B_n \text{ entonces } z = f_n(x, y)$$

La principal diferencia entre el método de Mamdani y el método TSK, es que no es necesario realizar un proceso de defusificación, ya que no se obtiene ningún

conjunto difuso sino un conjunto de funciones lineales. De esta manera, en el método TSK se puede obtener directamente el valor de salida del sistema [47].

4.2. Sistemas difusos para evaluar el peligro de incendios forestales

Existen trabajos relacionados con el estudio del medio ambiente, la preservación de los ecosistemas, así como de los incendios forestales, en donde se utilizan herramientas y técnicas de análisis mediante lógica difusa.

En el trabajo [49], se propone el uso de una red inalámbrica de sensores para la detección de incendios forestales. Esta red se encarga de tomar datos de variables meteorológicas, los cuales son utilizados posteriormente como datos de entrada del sistema de control propuesto. En este trabajo se desarrolló un algoritmo de lógica difusa, el cual usa cinco funciones de membresía, de la temperatura, el humo, la luz, la humedad y la distancia, en este sistema se definieron los rangos de los valores de las variables para cada función de pertenencia de la siguiente manera:

X1: Temperatura (0°C a 120°C) (Muy bajo, Medio, Alto)

X2: Humo (0 a 100 ppm) (Bajo, Medio, Alto)

X3: Luz (0 a 1000 lux) (Bajo, Medio, Alto)

X4: Humedad (0 a 100 ppm) (Bajo, Medio, Alto)

X5: Distancia (0 a 80m) (Cercano, Medio, Lejano)

El modelo de sistema de lógica difusa propuesto consiste en recolección de datos, fusificación, definición de reglas difusas y proceso de defusificación.

En este trabajo se implementó la herramienta de MATLAB de lógica difusa, mediante ella se encontró la probabilidad de la existencia de un incendio forestal, esta herramienta además permitió hacer un análisis más profundo para observar los efectos de cada entrada en todo el sistema.

En el trabajo [50], se propone una red de sensores inalámbricos. Cada nodo sensorial consiste en múltiples sensores que detectarán la temperatura, la humedad, la luz y la densidad del CO para calcular la probabilidad de incendio y el ángulo de acimut para calcular la dirección de este. Esto mejora la precisión del sistema de detección, también reduce la tasa de falsas alarmas.

En el análisis de datos se propone un mecanismo de detección de eventos utilizando un sistema basado en reglas difusas. Una vez son recolectados los datos obtenidos por los múltiples sensores, se enviaron a una estación base donde se implementa la lógica difusa basada en reglas. Para esta tarea se usó la herramienta de lógica difusa de MATLAB, ya que proporciona más precisión, flexibilidad y escalabilidad en comparación a otros sistemas [50].

El modelo de sistema de lógica difusa propuesto se muestra en la (Figura 34), este consiste en la recolección de datos, fusificación, las reglas difusas, el sistema de inferencia difusa y el proceso de defusificación [50].

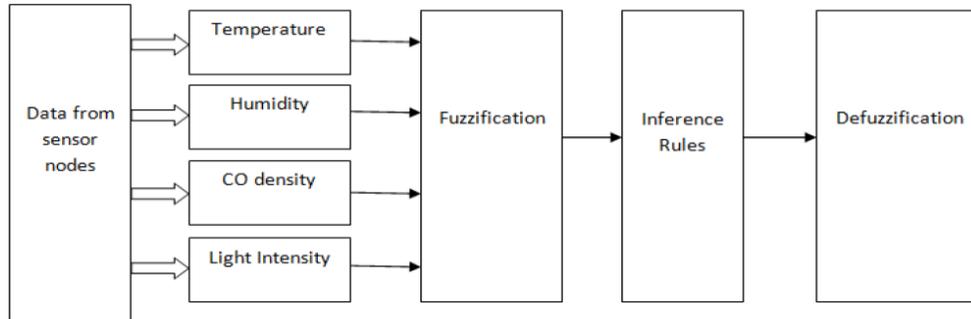


Figura 34. Mecanismo del Sistema de Detección de Incendios Forestales [50]

Las funciones de membresía y los parámetros pueden ser cambiados y modificados según sea necesario. También se pueden alterar y ajustar las reglas según los parámetros para ampliar aún más el trabajo sobre este modelo [50].

En el trabajo [51] se propone una red inalámbrica de sensores, propone una implementación basada en lógica difusa para manejar la incertidumbre en el problema de la detección de incendios forestales. Los nodos de sensores se utilizan para detectar la probabilidad de un incendio con variaciones durante diferentes momentos del día. Los nodos de sensores detectan la temperatura, la humedad, la intensidad de la luz, la densidad del CO₂ y el tiempo, y envían la información a una estación base. Este sistema propuesto mejora la precisión de la detección de incendios forestales y también proporciona un sistema de detección basado en tiempo real, ya que todas las variables de entrada se obtienen en tiempo real [51].

El sistema propuesto se desarrolló en 3 pasos, fusificación, inferencia y defusificación. Para verificar el correcto funcionamiento y la eficacia del sistema propuesto con respecto a las condiciones ambientales, se llevó a cabo la simulación con la herramienta de lógica difusa de MATLAB. La escala de probabilidad de incendio se da en una escala de 0 a 100 (Figura 35) [51].

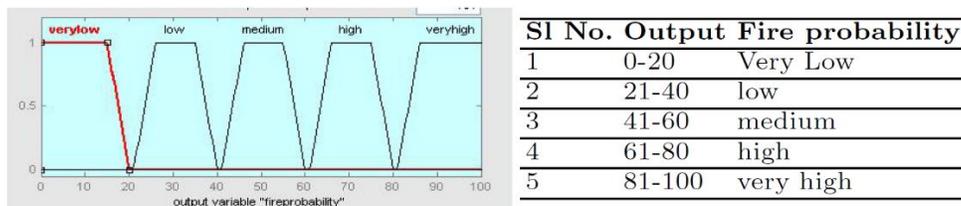


Figura 35. Condiciones de probabilidad [51]

En el trabajo [52] se propone una estimación a corto plazo la existencia de riesgos de incendio forestal y detectar la reciente aparición de brotes de incendios en diferentes zonas forestales. En este trabajo se propuso un sistema de control de incendios forestales basado en la lógica difusa con el fin de analizar la información ambiental, así como las variables meteorológicas, los gases contaminantes y el nivel de oxígeno, medido por una red de sensores inalámbricos. Se implementó un prototipo particular de dispositivo de internet de las cosas (IoT) equipado con sensores ambientales. Cuando se detecta la presencia de un incendio, se habilita un método de toma de decisiones basado en un proceso de jerarquía analítica (PHA) para determinar la zona forestal vecina que tiene más probabilidades de favorecer la propagación del fuego como resultado de sus condiciones ambientales actuales [52].

En este trabajo se utilizó la aplicación FuzzyTECH para simular el controlador de incendios forestales propuesto (Figura 36) [52].

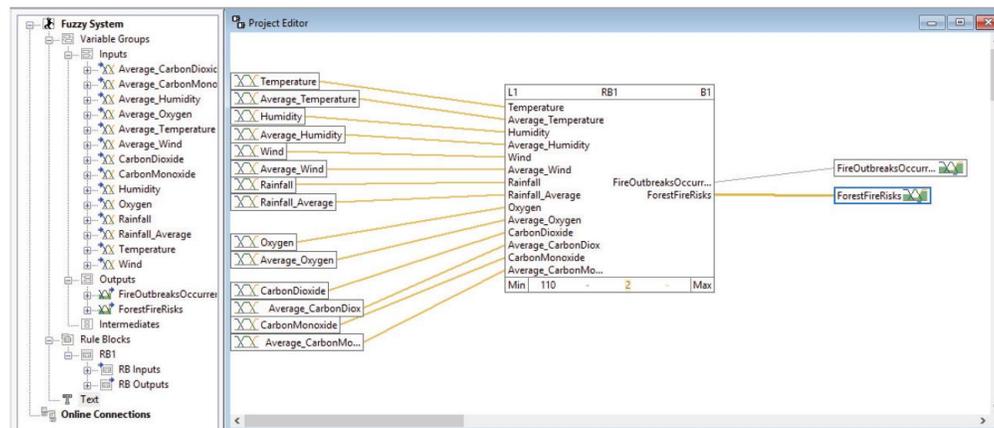


Figura 36. Generación del controlador de incendios forestales propuesto en la aplicación fuzzyTECH [52]

El sistema propuesto, permite estimar la existencia de riesgos de incendios forestales, detectar incidentes recientes de incendios forestales y activar alertas ambientales. Los elementos registrados fueron integrados en un servicio web y una aplicación móvil para mejorar la coordinación de los cuerpos de emergencia [52].

En el trabajo [53] se introduce una generalización del algoritmo de inferencia propuesto por Mamdani, mediante el uso de funciones e índices de superposición. Para esta tarea, se propone utilizar la combinación convexa, con ello, las conclusiones obtenidas por un sistema de lógica difusa evitan los malos resultados obtenidos por una expresión de superposición inadecuada. Para probar el sistema propuesto, se implementó una red de sensores inalámbricos para la detección de

incendios forestales. Las variables meteorológicas utilizadas fueron la temperatura, humo, luz, humedad y la distancia [53].

El sistema de lógica difuso calcula el riesgo de incendios forestales, este es representado por el conocimiento mediante un conjunto de reglas difusas compuestas por términos lingüísticos [53].

En la investigación realizada se encontró que la técnica de lógica difusa, en tareas como lo es la detección de incendios forestales, proponen una solución para determinar la presencia de este fenómeno. Esta técnica da estabilidad y robustez al sistema, ya que las variables monitoreadas se definen por datos obtenidos en tiempo real, el cual es un factor de gran importancia para detectar el fenómeno con el que se pretende trabajar. Esta técnica permite agregar condiciones que ayuden obtener el resultado adecuado, además de ser intuitiva, ya que imita la forma de pensar de las personas y puede ser ajustada para trabajar en diversas tareas.

Mediante esta técnica se puede realizar una estimación en un periodo de tiempo muy corto, lo cual ayuda a mejorar el tiempo de respuesta con el que los equipos que se dedican a la prevención y detección de incendios forestales responden a este fenómeno. La técnica de lógica difusa destaca por el tiempo corto de ejecución en comparación a otras técnicas, además de que el proceso matemático que requiere es mucho menor.

4.3. Análisis de datos utilizando inteligencia artificial

Existen otras herramientas y técnicas que hacen uso de inteligencia artificial para realizar un análisis de datos, estas se describen en el Anexo 8.1.

5. DISEÑO DEL SISTEMA DE MONITOREO PARA LA EVALUACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

5.1. Diagrama conceptual del sistema inteligente de monitoreo

El sistema conceptual desarrollado se presenta en la (Figura 37); este se propone aplicar a la REPSA para identificar los cambios que se presentan en las condiciones de la humedad y la temperatura, con el fin de evaluar la presencia de incendios forestales.

En el sistema que se desarrolló, dentro del objetivo principal se plantea el monitoreo en puntos estratégicos de la REPSA, en donde se capturará información sobre variables meteorológicas de humedad y temperatura. Este consta de cuatro bloques (Figura 37):

- 1) Adquisición de datos: en este bloque se desarrollará e implementará una red de estaciones de monitoreo, las cuales recabarán datos de las variables meteorológicas de humedad y temperatura. Los datos obtenidos serán enviados mediante comunicación inalámbrica a una estación base central que estará ubicada en el ICAT.
- 2) Base de datos: la información recabada por los sensores de humedad y temperatura serán almacenados, esto con el fin de crear anualmente un registro de las condiciones meteorológicas de la REPSA.
- 3) Calibración: los datos obtenidos serán tratados para posteriormente ser analizados mediante lógica difusa.
- 4) Sistema de lógica difusa: en este bloque se presentan los datos que han sido obtenidos con ayuda de la red de estaciones de monitoreo. Este sistema de análisis realizará una estimación a corto plazo del riesgo que puede presentar un incendio forestal.

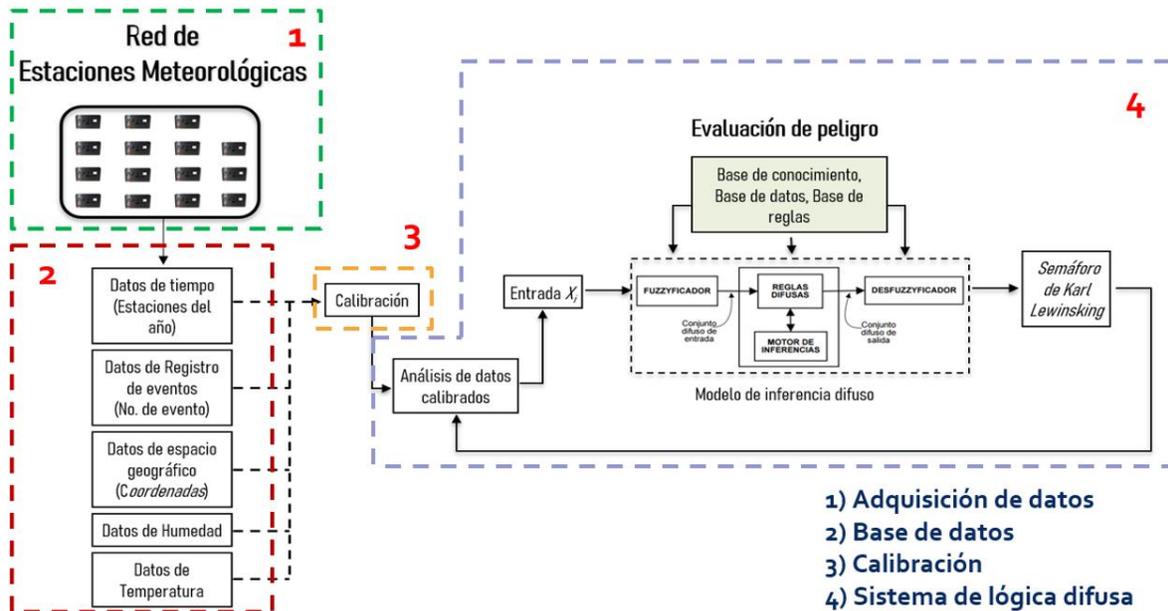


Figura 37. Sistema de monitoreo basado en lógica difusa.

5.2. Características del sistema de monitoreo

Tras haber realizado una investigación de los factores que son necesarios para monitorear y poder determinar la presencia de un incendio forestal, se han establecido las características para el sistema propuesto, estos se listan a continuación.

- Se requiere una red de estaciones inalámbricas que se ubiquen en puntos estratégicos.
- Cada una de las estaciones de la red, debe contar con sensores que midan las variables meteorológicas de humedad y temperatura. Para la humedad se requiere un sensor que pueda tomar mediciones de 0 a 90 %HR. Para la temperatura se requiere un sensor que pueda tomar mediciones de 0 a 70 °C.
- Los sensores deben poder tomar mediciones cada 5 minutos.
- Cada estación de la red de monitoreo debe contar con un dispositivo para almacenar los datos obtenidos por los sensores, esto con el fin de tener un respaldo de la información recolectada. Los datos deben ser almacenados una vez que son obtenidos por los sensores de humedad y temperatura, es decir cada 5 minutos.
- Debido a que se monitoreará una zona de gran tamaño (52 hectáreas), se requiere implementar un protocolo de comunicación de gran alcance (2 km).
- Las estaciones de monitoreo deben contar con un sistema de energía independiente.

- Para la recolección de datos, es necesario diseñar una interfaz gráfica, la cual se ubicará en una estación base central que se encontrará en el ICAT.
- La interfaz debe de poder no solo monitorear las variables meteorológicas, también se requiere que pueda detectar fallas en la red inalámbrica que se propone.
- Se requiere un sistema de análisis de datos que utilice lógica difusa, el cual proporcione el estado de la red de estaciones.
- La red de estaciones deberá trabajar las 24 horas del día.

5.3. Requerimientos y especificaciones de las estaciones de monitoreo

En la (Tabla 8) se muestran los requerimientos y especificaciones de las estaciones individuales de monitoreo.

Tabla 8. Requerimientos y especificaciones de las estaciones individuales de monitoreo

Requerimientos	Especificaciones		
El sistema debe medir la variable meteorológica de temperatura.	Temperatura mínima :	0	[°C]
	Temperatura máxima:	70	[°C]
	Resolución:	0.1	[°C]
El sistema debe medir la variable meteorológica de humedad.	Humedad mínima :	0	[%HR]
	Humedad máxima:	90	[%HR]
	Resolución:	1	[%HR]
Autonomía	Tiempo de trabajo de las estaciones de monitoreo:	24	Horas
Almacenamiento de datos	Tiempo de almacenamiento entre los datos obtenidos:	5	Minutos
Envío de datos	Tiempo transcurrido entre el envío de los datos obtenidos:	5	Minutos

Tras haber realizado una investigación, se encontró que los sistemas de monitoreo de variables meteorológicas utilizadas para monitorear incendios forestales, cuentan con intervalos de medición para la temperatura de 0 a 70 °C y para la humedad de 0 a 90 %HR, la resolución que se utiliza para la temperatura es de 0.1 °C y para la humedad de 1 %HR.

Debido a que la tarea de monitoreo de un incendio forestal requiere de una observación constante, se ha establecido que estas deben de estar en funcionamiento las 24 horas del día.

Con el fin de tener un respaldo de la información obtenida por las estaciones individuales de monitoreo, se ha establecido que cada 5 minutos se guarde la información en un dispositivo de almacenamiento que se encontrará dentro de cada estación. A su vez, cuando se realice el almacenamiento de la información, esta será enviada a una base central, se ha establecido que el tiempo transcurrido entre el envío de datos sea igualmente de 5 minutos.

El sistema que se propone para la detección de incendios forestales realizará un monitoreo de variables meteorológicas de humedad y temperatura. Los datos recolectados se almacenarán en una tarjeta de memoria, a su vez, estos se enviarán a una estación base central que realizará un análisis usando un sistema de lógica difusa, el cual emitirá el nivel de peligro de la zona que estará bajo observación. En la (Figura 38) se presenta un diagrama de bloques de los elementos que se implementaron en el sistema de monitoreo propuesto.

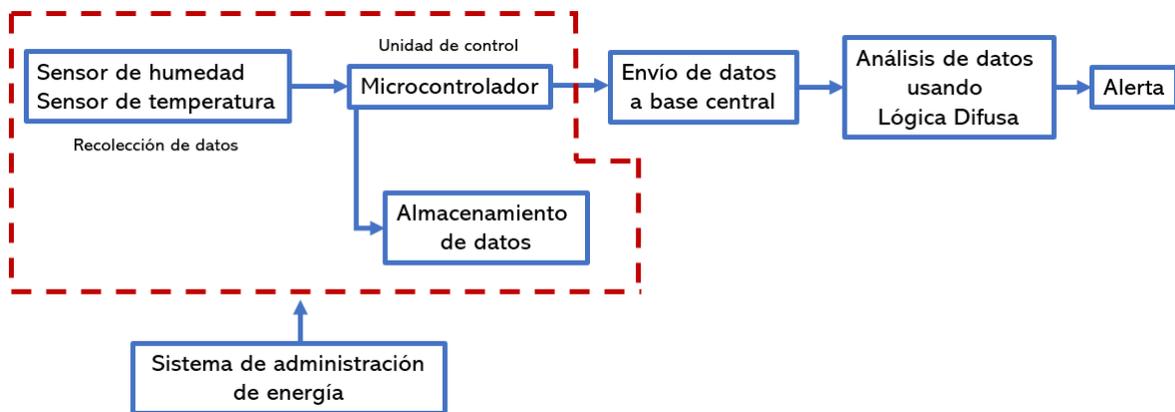


Figura 38. Diagrama de los elementos del sistema basado en redes inalámbricas para evaluar el peligro de incendios forestales

5.4. REPSA: dimensiones y definición de los puntos estratégicos de ubicación para las estaciones meteorológicas complementarias

En el desarrollo del sistema se consideró como caso de estudio la REPSA, siendo una zona propensa a este tipo de fenómenos naturales, en donde se hace un estudio de los puntos estratégicos donde se ubicarán las estaciones de monitoreo.

La REPSA abarca un área de 237 hectáreas que se divide en tres zonas principales: 1) Núcleo Oriente, 2) Núcleo Poniente y 3) Núcleo sur Oriente, donde el tipo de vegetación que predomina es el matorral xerófilo (Figura 39).



Figura 39. Zonas del área de la REPSA, 1) Núcleo Oriente, 2) Núcleo Poniente, 3) Núcleo sur Oriente [27]

La REPSA como su nombre lo indica, es una reserva protegida en donde el flujo de seres humanos es limitado e incluso en algunas partes nula, por ende cada temporada de lluvia, de heladas y de estiaje hacen que exista una acumulación de biomasa que a lo largo se va acumulando como combustible vegetal, siendo este un elemento latente que está disponible ante un fenómeno natural o antrópico que desencadene el fuego; con base en esto a través de los registros históricos se conoce que los incendios forestales año con año se suscitan en estas zonas, deteriorando incluso el ecosistema, dentro de su ecosistema existe incluso flora y fauna única en el mundo, por ende es importante poder estudiar el fenómeno de incendios forestales con el fin de poder dar un monitoreo oportuno para minimizar el impacto en esta importante reserva única en el sur de la Ciudad de México.

Conocimiento y ubicación de la vegetación en la REPSA e incendios forestales

La vegetación clasificada como matorral xerófilo que se ubica dentro de la REPSA, son plantas que en su mayoría son de baja altura (menor a los 4 metros), y que su hábitat es seco. Las especies que se pueden encontrar, en esta zona, son el palo loco, palo dulce, encino desertícola, dodonaea viscosa, eucalipto y fresno (Figura 40) [27].



Figura 40. a) Palo loco, b) Palo dulce, c) Encino desertícola, d) Dodonaea viscosa, e) Eucalipto f) Fresno [54]

Además, se encuentra en esta zona plantas como flor sprekelia, cosmos, flor estrellita de San Nicolás, el pasto kikuyo, tlacote, dalia, entre otras especies (Figura 41) [27].



Figura 41. a) Flor Sprekelia, b) Cosmos, c) Flor Estrellita de San Nicolás, d) Pasto Kikuyo, e) Tlacote, f) Dalia [43]

Se ha registrado que en la REPSA el matorral xerófilo abarca el 75%, el 17% está cubierto por pasto kikuyo y el resto son el 8%. En la (Figura 42) se muestra la ubicación de la vegetación y su ubicación [27].

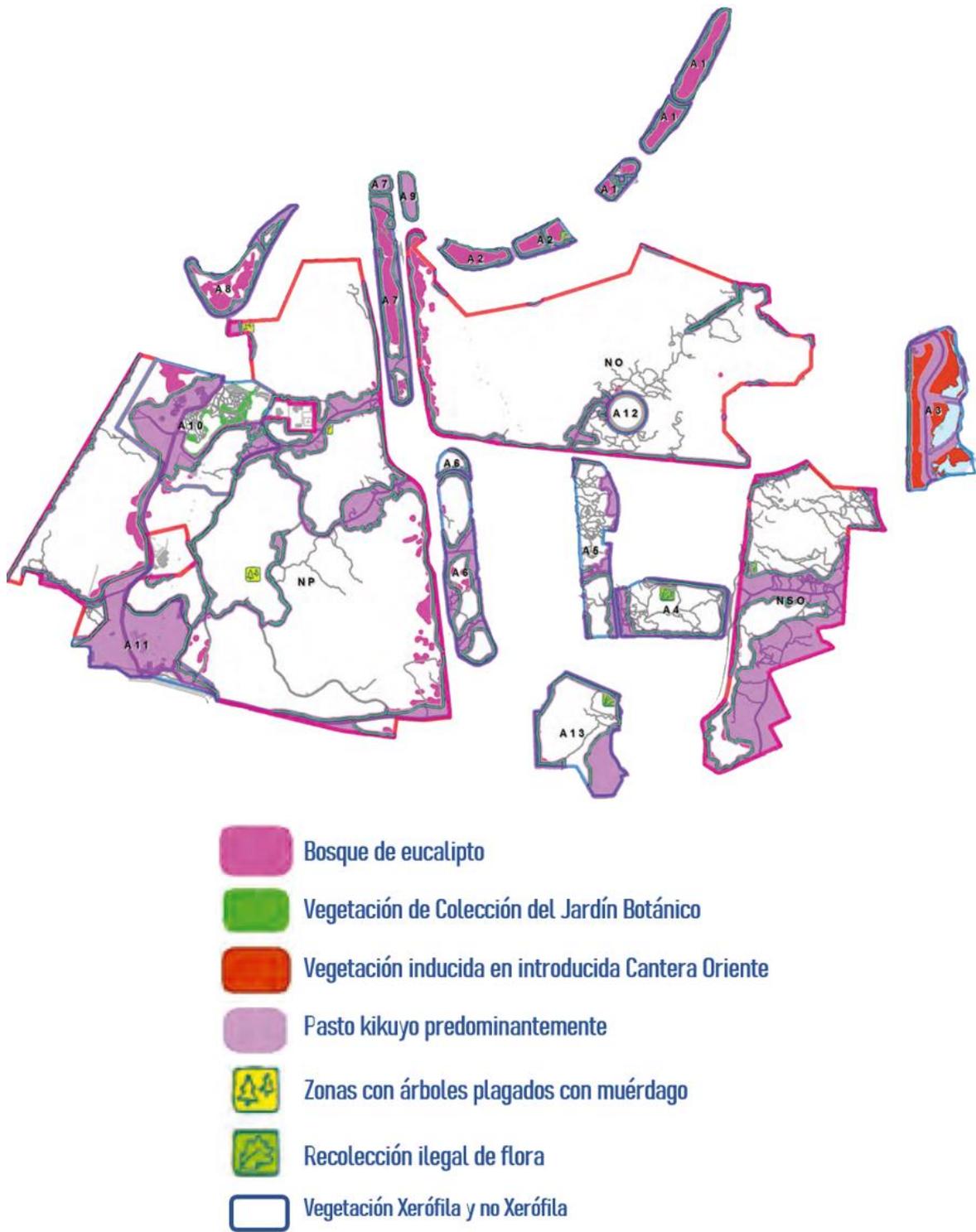


Figura 42. Mapa de la vegetación en la REPSA [27]

En la (Figura 43) se muestra el registro historio realizado por la secretaria de estudio de la REPSA de los incendios forestales que se han suscitado a lo largo de 20 años [27].

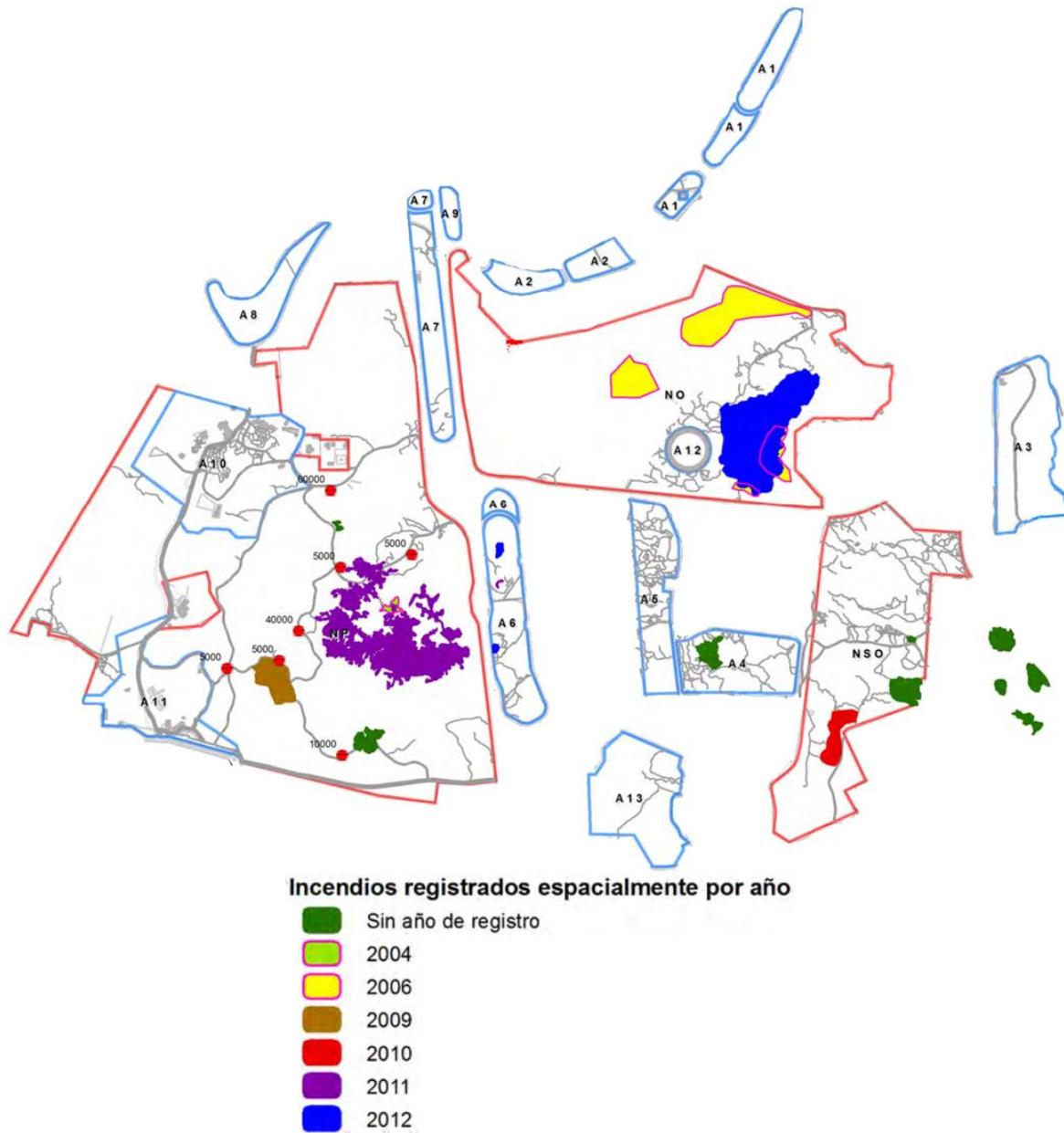


Figura 43. Mapa de incendios forestales registrados en la REPSA [27]

5.3.1. Desarrollo de los puntos estratégicos

Un punto estratégico puede ser definido como una ubicación específica que cuenta con características relevantes tales como el registro previo de incendio forestal y la presencia de vegetación, en comparación con una ubicación seleccionada de manera aleatoria. Estas características fueron encontradas al realizar un estudio de la zona con la que se trabajó (zona núcleo oriente de la REPSA)

En el desarrollo de los puntos estratégicos se fusionaron los mapas de la (Figura 42) y (Figura 43) para obtener información de la ubicación de la vegetación y la zona en donde se han presentado incendios.

En la (Figura 44) se muestra el núcleo oriente de la REPSA, donde se encuentra la estación de monitoreo del ICAT, siendo esta la responsable principal de estudio de esta zona, en este lugar se integrará el sistema de monitoreo propuesto, por lo que aquí se inició el estudio de puntos estratégicos.

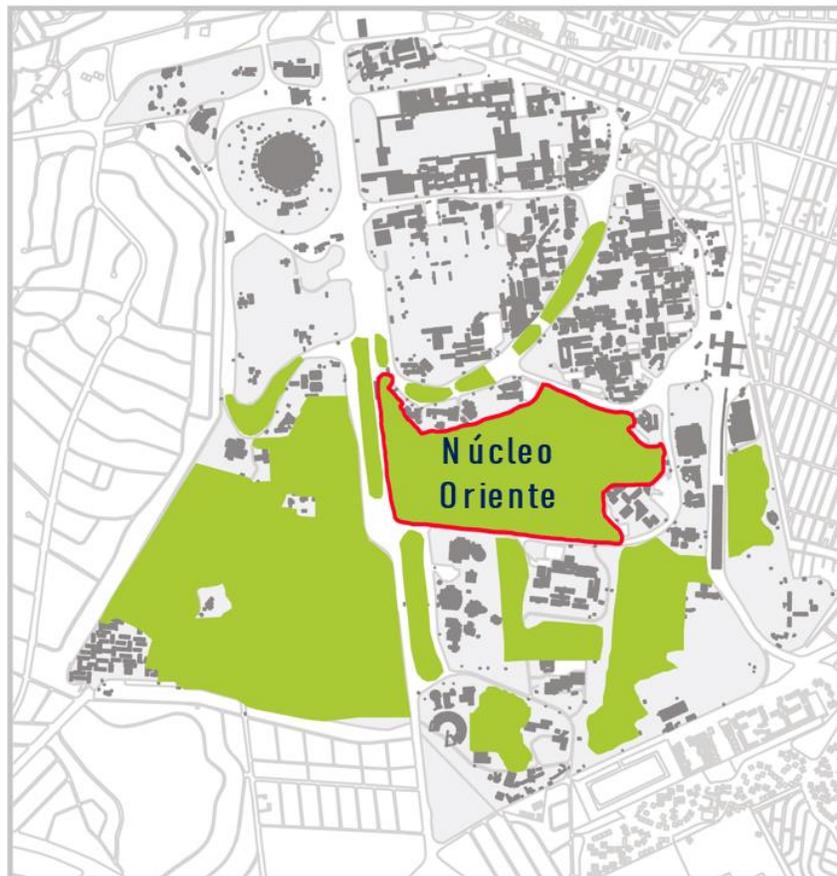


Figura 44. Zona núcleo oriente de la REPSA seleccionada para la ubicación de estaciones de monitoreo [27]

Para determinar los puntos estratégicos, se tomó como referencia el problema de la galería de arte. Este es un problema de geometría computacional, el cual tiene como objetivo encontrar el mínimo número de puntos de un polígono que permiten observar a los demás [55]. En la tarea de incendios forestales, se planteó encontrar el mínimo número de estaciones que permitan monitorear toda el área núcleo oriente de la REPSA. Para localizar los puntos estratégicos, se desarrolló un algoritmo en MATLAB.

El algoritmo realiza una transformación de la imagen de la zona que se trabaja a formato binario y define el número de puntos estratégicos en donde se ubicarán las estaciones, para identificar o definir los puntos estratégicos, se localizan las zonas de estudio a través de identificar el contorno (perímetro) de la zona de la REPSA en donde se registran los incendios (Figura 45, a).

El algoritmo trabajó de la siguiente forma: 1) ubica un número de puntos aleatorios en el contorno de esta zona y de la superficie quemada por incendios, en este caso se ubicaron 85 puntos (Figura 45, b). 2) Se marcan los trazos que se encuentran ubicados lo más cerca posible de las zonas que presentan información de la superficie quemada por incendios (Figura 45, c). Para reducir el número de puntos aleatorios, se realiza un proceso de optimización considerando los polígonos que previamente fueron trazados. 3) A fin de localizar los puntos estratégicos dentro de los polígonos previamente obtenidos, fue necesario calcular el centroide. Con el fin de ubicar más de un punto estratégico dentro de los polígonos que se encuentran dentro de la zona de trabajo, estos fueron divididos en polígonos de menor tamaño, para ellos también fue necesario calcular su centroide (Figura 45, d). Tras calcular los centroides, estos fueron seleccionados como puntos estratégicos, los cuales cuentan con la característica de ser ubicados en las zonas que cuentan con información relevante tal como el registro previo de incendio forestal y la presencia de vegetación, además de que abarcan el área núcleo oriente de la REPSA.

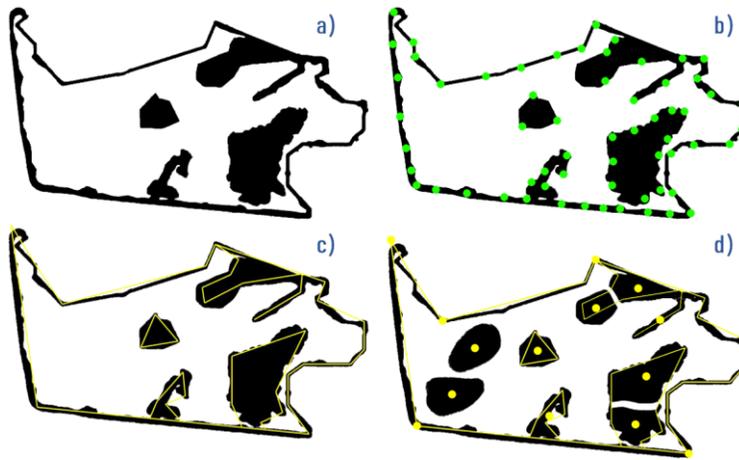


Figura 45. a) Imagen binaria, b) Puntos aleatorios ubicados en las áreas con información de incendios y presencia de vegetación, c) Trazo de polígonos dentro del área de trabajo, d) Puntos estratégicos obtenidos

El resultado de optimizar esta zona a través de puntos aleatorios nos muestra como primer resultado 15 puntos estratégicos de ubicación de las estaciones para monitoreo de la vegetación en la zona oriente (Figura 46).

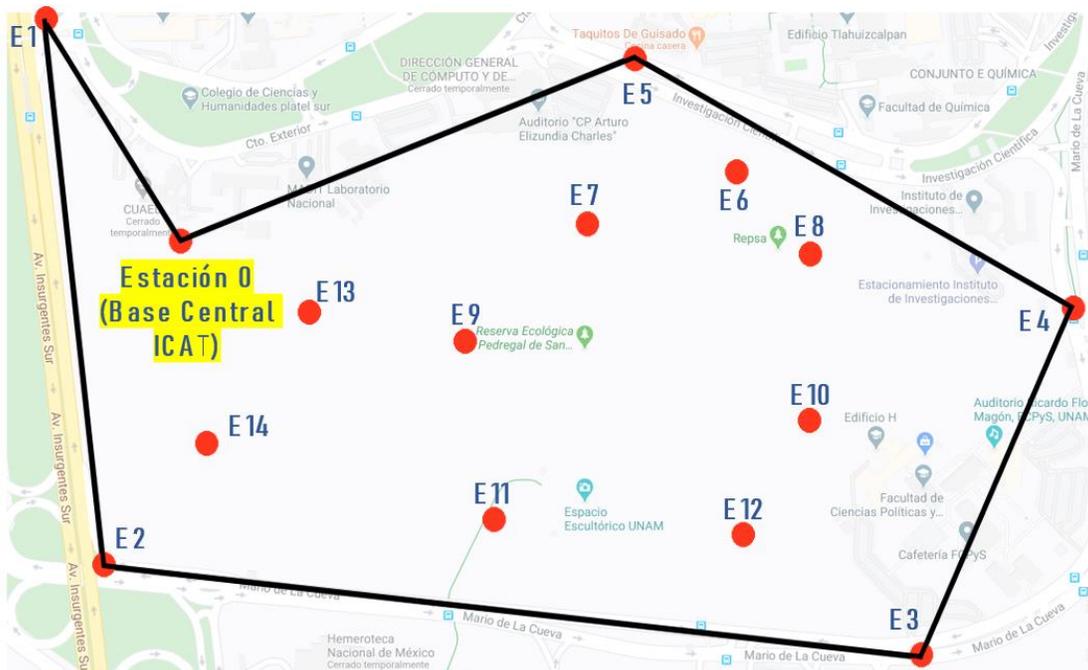


Figura 46. a) Polígono encontrado y puntos estratégicos obtenidos con el algoritmo b) Ubicación de las estaciones individuales en los puntos estratégicos localizados.

En la (Figura 46, b) se representan por E_i ($i = 0, 2, \dots, 14$) las estaciones complementarias a la del ICAT (E_0). Las coordenadas obtenidas por Google Maps [56] fueron:

- E_0 (19.321518, -99.186671)
- E_1 (19.323443, -99.188114)
- E_2 (19.318136, -99.187529)
- E_3 (19.317275, -99.178474)
- E_4 (19.320134, -99.176526)
- E_5 (19.323364, -99.182706)
- E_6 (19.322230, -99.181043)
- E_7 (19.321866, -99.182760)
- E_8 (19.321036, -99.179498)
- E_9 (19.320034, -99.183779)
- E_{10} (19.319538, -99.179992)
- E_{11} (19.318151, -99.183103)
- E_{12} (19.317827, -99.180850)
- E_{13} (19.320840, -99.184918)
- E_{14} (19.319252, -99.186413)

5.5. Desarrollo de las estaciones meteorológicas

El desarrollo del sistema está conformado por estaciones meteorológicas de monitoreo que se componen por sensores de humedad y temperatura, un microcontrolador, dispositivo de comunicación inalámbrica, datalogger y una fuente de alimentación.

5.4.1. Selección de sensores de humedad y temperatura

Como se mencionó en los requerimientos del sistema, fue necesario considerar un sensor de humedad que pudiera tomar mediciones en un rango de 0 a 90 %HR y para la temperatura se requirió un sensor que pudiera tomar mediciones de 0 a 70 °C.

En el monitoreo de la humedad y temperatura, se consideró trabajar con un sensor comercial que fue seleccionado con base en sus características. El sensor con el que se decidió trabajar fue el DHT22, su rango de medición para la humedad es de 0 al 100% HR y para la temperatura de -40 hasta 80°C [57].

Tabla 9. Especificaciones del sensor DHT22

Rango de medición	Humedad	0 – 100 %RH
	Temperatura	-40~80 °C
Precisión	Humedad	±2 %RH
	Temperatura	±0.5 °C
Resolución	-	0.1
Encapsulado	-	4 pin



Figura 47. Sensor de humedad y temperatura DHT22 [58]

Se utilizó también un sensor de temperatura infrarrojo. El MLX90614 puede medir la temperatura de su entorno y de un objeto en específico. Cuenta con un rango de medición alto, para la temperatura de los objetos por infrarrojo va de -40 hasta los 380°C, por otro lado, tiene un rango de medición de -40 hasta los 125°C para la medición de temperatura de su entorno. Cuenta con comunicación I2C lo cual lo hace compatible casi con cualquier microcontrolador [59].

Tabla 10. Especificaciones del sensor infrarrojo MLX90614

Parámetros	Condiciones	Mínimas	Típicas	Máximas
Resolución			0.02°C	
Exactitud			±0.5°C	
Rango de medición	Ambiente	-40 °C		125 °C
	Objeto	-40 °C		380 °C



Figura 48. Sensor infrarrojo de temperatura MLX90614 [60]

5.4.2. Almacenamiento de datos

Como se estableció en los requerimientos, fue necesario que cada una de las estaciones de la red de monitoreo pudiera almacenar los datos obtenidos por los sensores, esto con el fin de tener un respaldo de la información recolectada. Para ello se implementó un sistema que almacenara la información en una tarjeta microSD.

Cada estación captura y almacena información obtenida por los sensores cada 5 minutos, esto permite no perder información que se haya recabado. Se trabajó con un módulo que permite el almacenamiento y la lectura de datos en una tarjeta microSD (Figura 49). Este módulo trabaja mediante comunicación SPI. Los datos se almacenan en un archivo de texto (.txt).

En la selección del tamaño de la memoria que se utilizó para el almacenamiento de datos, se realizaron los cálculos considerando el tamaño en bytes de cada línea de información capturada, así como el tiempo entre cada captura, el cual como ya se mencionó previamente fue de 5 minutos. Las estaciones de monitoreo capturan datos de 3 sensores de temperatura y uno de humedad, estos al almacenarlos en la tarjeta de memoria tienen la siguiente estructura:

XX.XX, XX.XX, XX.XX, XX.XX

Cabe mencionar que al final de cada línea de datos capturados existe un salto de línea, por lo que en total se obtuvo un tamaño de 28 bytes. Tras haber obtenido este resultado, se calculó el número total de datos esperados en un periodo de 1 año. Los datos calculados se muestran en la (Tabla 11).

Tabla 11. Datos totales esperados en un año

Año	Minutos totales	Líneas de datos esperadas	Bytes totales	Megabytes totales
1	525,600	105,120	2,943,360	2.807

Por lo cual, se espera que en un año se almacenen en la tarjeta de memoria, un total de 105,120 líneas de datos de los sensores de humedad y temperatura. Estas a su vez, se calculó que ocuparán un total de 2.807 MB de almacenamiento.

Tras obtener este resultado, se seleccionó una tarjeta de memoria de 2 GB, esta cuenta con espacio para almacenar datos a lo largo de 729 años, sin embargo, se espera que los datos sean recolectados cada año.

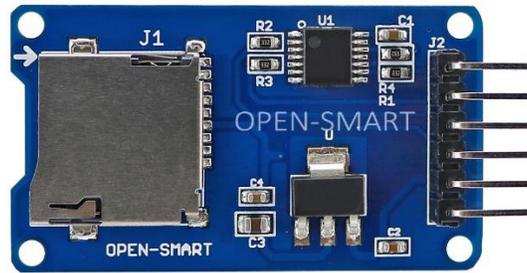


Figura 49. Módulo MicroSD [61]

5.4.3. Envío y recepción de datos; selección del dispositivo de comunicación

Los dispositivos de comunicación son los encargados del envío y recepción de la información a la base central. Estos conforman una red de comunicación inalámbrica.

Las redes inalámbricas utilizan ondas de radio para conectar los dispositivos que se encuentran dentro de ella. Además, este tipo de redes permiten a los dispositivos remotos que se conecten sin dificultad, independientemente que estos dispositivos estén a unos metros o a varios kilómetros de distancia [62].

Actualmente existen diversos estándares de comunicación inalámbrica que permiten crear redes de comunicación, algunos ejemplos de ellos son el Wifi (WLAN), Bluetooth, ZigBee y LoRaWAN.

Wifi (WLAN)

Las redes inalámbricas de área local o WLAN están diseñadas para proporcionar acceso inalámbrico en zonas que pueden llegar a tener un rango de 100 metros. Son utilizadas en el hogar, escuela o entornos de oficina. Proporciona a los usuarios la capacidad de moverse dentro del área de cobertura y permanecer conectado a la red. Este tipo de redes se basan en el estándar 802.11 del IEEE y son comercializadas bajo la marca Wi-Fi [62].

Bluetooth

Este pertenece al estándar IEEE 802.15.1. Originalmente fue diseñado para comunicaciones de punto a multipunto (omnidireccionales), de bajo consumo de energía, corto alcance y que conectarían dispositivos baratos, esto con el fin de reemplazar el uso de cables. Los dispositivos que incorporan esta tecnología se clasifican en tres grupos diferentes según su alcance máximo: clase 1 que puede alcanzar un rango de 100 metros, clase 2 que puede alcanzar un rango de 10 metros y clase 3 que puede alcanzar un rango de 1 metro [62].

ZigBee

Este se encuentra basado en el estándar IEEE 802.15.4 que fue desarrollado como un estándar global abierto para poder satisfacer necesidades de fácil aplicación, alta fiabilidad, bajo costo, bajo consumo y bajas velocidades de transmisión de datos en redes de dispositivos inalámbricos. Puede operar en las bandas de 2.4 GHz, 900 MHz y 868 MHz con una velocidad de transmisión de hasta 250 Kbps, suficiente para satisfacer las necesidades de un sensor y de automatización usando redes inalámbricas. Puede tener un alcance de hasta 120 m [62].

LoRaWAN

Es un protocolo de red que permite un intercambio de pequeñas cantidades de datos a baja velocidad, pero con un largo alcance, además de bajo consumo de energía. Usa la tecnología LoRa para comunicar y administrar dispositivos LoRa. Las siglas LoRa significan long range (largo alcance). Con este protocolo se pueden crear redes tanto públicas como privadas y puede tener un alcance de 10 a 15 km [63], [64].

Características específicas de comunicación en la REPSA

Se determinó que el protocolo adecuado para implementar un sistema de comunicación adecuado a la REPSA fue acorde a la distancia entre las estaciones individuales, para ello se tomó una medición de la zona núcleo oriente de la REPSA con ayuda de la página Google Maps, marcando el polígono de 6 lados obtenido por el algoritmo desarrollado para ubicar las estaciones individuales, se encontraron las siguientes distancias;

- L1=626.71 m,
- L2=1.01 km,
- L3=454.58 m,
- L4=606.66 m,
- L5=581 m,
- L6=295.25 m.

Adicionalmente se consideró la distancia entre el ICAT y el punto más alejado del área con la que se trabajará, ya que la base central se encontrará ubicada justamente en el ICAT, la distancia obtenida fue de DL=1.17km (Figura 50).

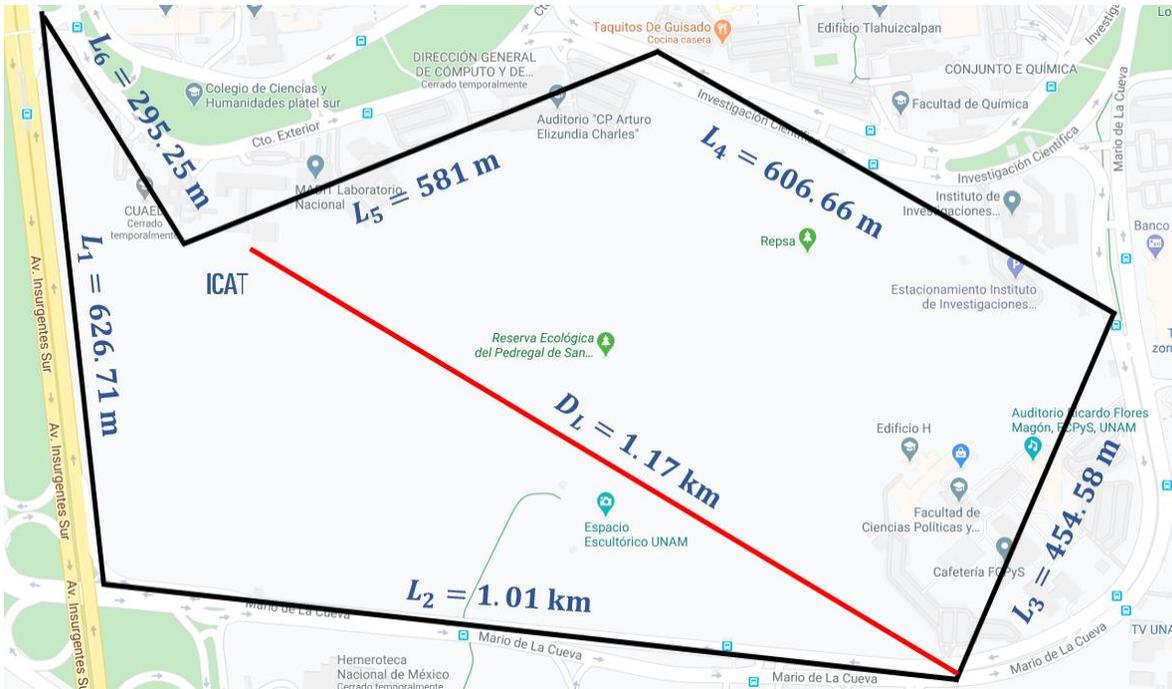


Figura 50. Distancias obtenidas en la zona núcleo oriente de la REPSA

Con esta información se consideró utilizar un dispositivo de comunicación que tuviera un alcance superior a 1.2 Km. Ya que el alcance del protocolo LoRaWAN es superior a la distancia máxima encontrada fue seleccionado para ser implementado.

Realizando una búsqueda, se determinó trabajar con la tarjeta LILYGO TTGO T-Beam V1.0, la cual cuenta con la característica LORA 32, además de contar con Wifi, Bluetooth y GPS (Figura 51).

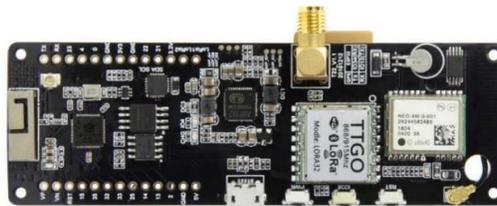


Figura 51. Tarjeta LILYGO TTGO T-Beam V1.0 [65]

5.4.4. Selección de microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado que posee la cualidad de ser programable, generalmente es usado para llevar a cabo uno o varios procesos. Cuenta con los siguientes componentes:

- Procesador o CPU (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para Contener los datos.
- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, Puertas Serie y Paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema [66].

En la selección del microcontrolador, se consideraron las características de los sensores de humedad y temperatura, así como del módulo de tarjeta microSD. Para conectar el sensor de humedad y temperatura con el microcontrolador, se requería que este contara con puertos digitales. Como se utilizó también el sensor de temperatura MLX90614, fue necesario considerar que el microcontrolador contara con el protocolo de comunicación I2C, ya que este se comunica utilizando este protocolo. Por último, para conectar el módulo de tarjeta microSD era necesario que el microcontrolador contara con comunicación SPI.

Tras considerar las características de los sensores, así como del módulo de tarjetas microSD, se optó por utilizar el microcontrolador ATmega328p. Además de que, en la investigación realizada, se encontró que este es frecuentemente utilizado en redes de sensores inalámbricas implementadas para la detección de incendios forestales.

Las estaciones cuentan con el microcontrolador ATmega328p. Este cuenta con 23 pines que pueden ser definidos como entrada o salida, de ellos 6 pueden ser usados como PWM. Además, cuenta con 8 entradas analógicas, y dispone de comunicación I2C y SPI. El consumo de este microcontrolador es de 15 mA.

ATMEGA328 PINOUT

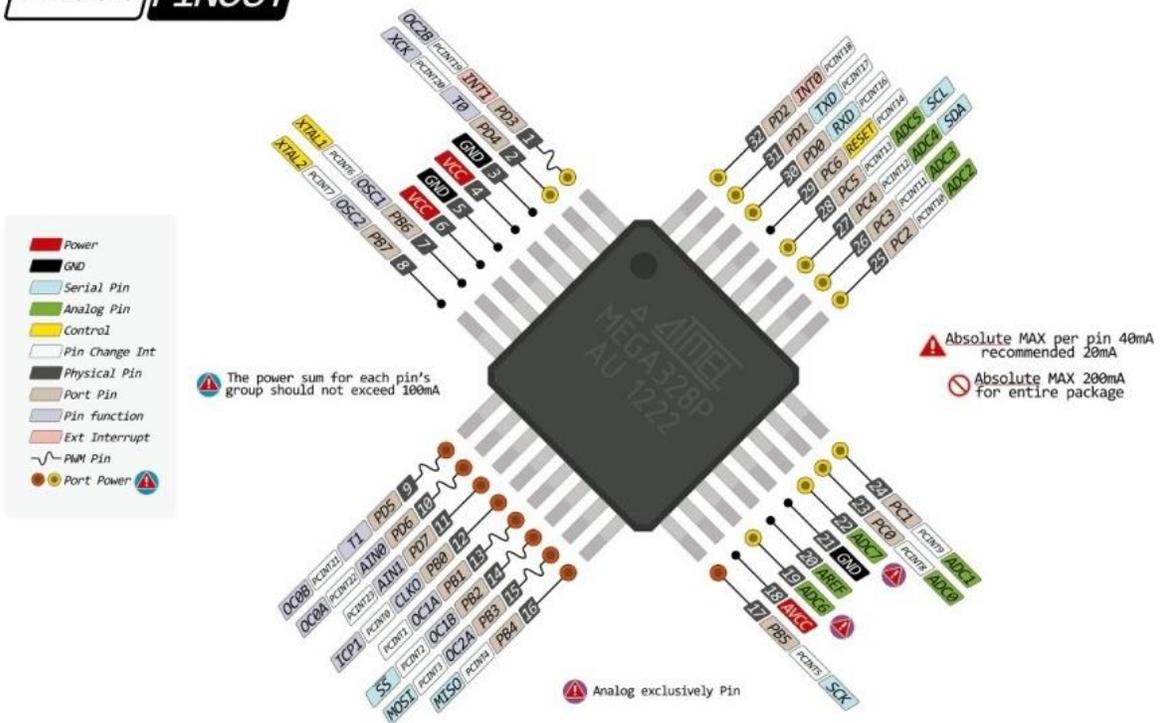


Figura 52. Pinout ATMEGA328P [67]

5.4.5. Fuente de alimentación para las estaciones de monitoreo

Como se estableció en los requerimientos, las estaciones de monitoreo debían de contar con un sistema de energía independiente debido a que en el área donde se pretenden implementar, no se cuenta con una red eléctrica cercana, además de que es necesario que las estaciones de monitoreo trabajen las 24 horas del día. Por lo que se propone alimentar al sistema con una batería.

Con el fin de determinar las características de los elementos que integrarán el sistema de alimentación y carga de baterías, en primer lugar, se obtuvo el consumo energético total necesario para alimentar a las estaciones individuales de monitoreo, fue necesario considerar el consumo energético de cada elemento que las compone, para ello se consultó la hoja de datos. En la (Tabla 12) se muestran los datos encontrados en las hojas de datos.

Tabla 12. Consumo energético de los elementos de la estación individual de monitoreo consultado en las hojas de datos

Elemento	Voltaje [V]	Consumo especificado en la hoja de datos [mA]	Potencia [mW]
Microcontrolador	5	15	75
Sensor DHT22	5	1.5	7.5
Sensor MLX90614	5	1	5
Módulo de tarjeta MicroSD	5	80	400
Dispositivo de comunicación	5	29	145
Display OLED	5	20	100
Ventilador	5	60	300
TOTAL		206.5	1032.5

Tras haber considerado el consumo energético de cada elemento, y al sumarlos, se encontró un total de 206.5 mA. De manera práctica se realizó una medición para comparar que el total del consumo fue el encontrado previamente al haber consultado las hojas de datos. En la (Tabla 13) se muestran las mediciones obtenidas de manera práctica.

Tabla 13. Consumo energético de los elementos de la estación individual de monitoreo obtenido de manera práctica

Elemento	Voltaje [V]	Consumo medido [mA]	Potencia [mW]
Microcontrolador	5	15.2	76
Sensor DHT22	5	1.2	6
Sensor MLX90614	5	1.3	6.5
Módulo de tarjeta MicroSD	5	95	475
Dispositivo de comunicación	5	35	175
Display OLED	5	10	50
Ventilador	5	57	285
TOTAL		214.7	1073.5

Tras haber realizado las mediciones de manera práctica, se encontró que el consumo energético total fue de 214.7 mA, este varió en un 3.97% respecto al consumo encontrado en las hojas de datos. Para seleccionar los elementos que integrarán el sistema de alimentación y carga de batería, se consideró finalmente un consumo de 215 mA.

El primer elemento considerado fue la batería. Actualmente en el mercado existen baterías recargables de diferentes tipos, entre las más populares se encuentran las baterías de Ni-Cd (níquel-cadmio), Ni-MH (níquel-metal hidruro) y Li-Ion (Ion de litio). La batería seleccionada fue la de ion de litio. Entre sus principales ventajas, se encuentran el poder almacenar una mayor cantidad de energía en un menor tamaño, presentan un porcentaje de rendimiento superior en comparación a otros tipos de baterías, lo cual se ve reflejado en la reducción de pérdida y en el aprovechamiento de energía. El ciclo de vida es mayor, pudiendo alcanzar hasta los 3500 ciclos. El tiempo de recarga es menor (entre 2 a 4 horas, dependiendo de la capacidad de la batería), y carecen de efecto de memoria, el cual es un fenómeno que reduce la capacidad de la batería con cargas incompletas, este se produce cuando una batería se carga sin antes haberla descargado completamente [68] [69].

La batería seleccionada fue la UR18650F de SANYO. Esta puede proporcionar un voltaje de 3.7 V y cuenta con una capacidad de 2.4 Ah (Figura 53).



Figura 53. a) Batería de ion de litio 18650 [70]

Una vez seleccionada la batería, fue necesario considerar el circuito para cargarla. Como ya se mencionó previamente, las estaciones se ubicarán en lugares que no cuentan con una red eléctrica cercana, por lo cual se propone un cargador de baterías solar, para ello fue necesario seleccionar dos elementos. En primer lugar, el circuito para cargar la batería y en segundo lugar la celda solar que proporcione la alimentación al circuito de carga de batería.

Tras haber realizado una búsqueda de los circuitos integrados utilizados para cargar baterías de ion de litio 18650 que fue seleccionada, se encontró que el circuito que se utiliza frecuentemente es el TP4056. Este circuito integrado cuenta con una arquitectura interna P-MOSFET, cuenta con un circuito de carga anticáida lo cual permite que no sea necesaria la presencia de un diodo de bloqueo externo. La retroalimentación térmica se ajusta automáticamente a la corriente de carga para limitar la temperatura durante el funcionamiento a alta potencia o en condiciones de

alta temperatura ambiente. El voltaje de carga está fijado en 4.2V y la corriente de carga puede ser ajustada por una resistencia externa. Cuenta con un chip dentro del transistor de potencia que hace que la carga sea a corriente constante al igual que el voltaje. Además, cuenta con un par de leds que indican cuando la batería se encuentra cargando y cuando está completamente cargada. Adicionalmente cuenta con un circuito de protección de descarga. Este circuito puede ser alimentado con un voltaje de 4 a 8V [71].

Para implementar el circuito TP4056 en el sistema de carga de batería, se consideró un módulo que adicionalmente al circuito de carga cuenta con un circuito de protección (Figura 54).

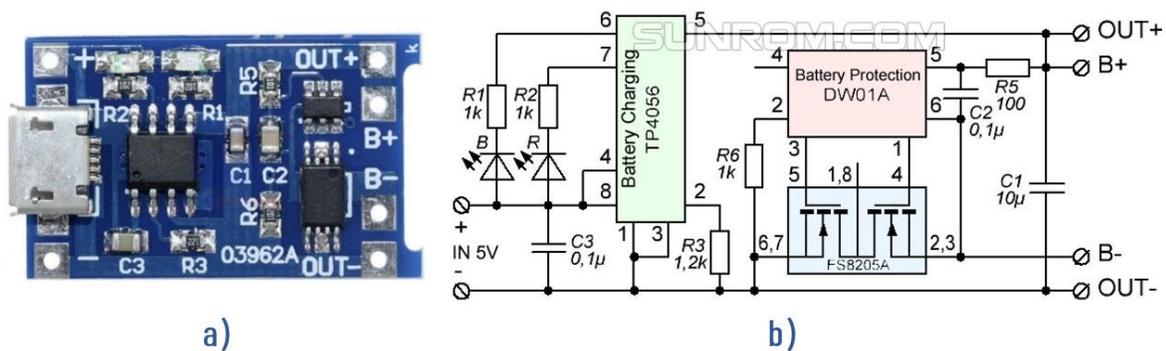


Figura 54. a) Módulo implementado para la carga de batería de ion de litio, b) Circuito del módulo de carga de batería [72] [73].

Tras haber seleccionado el circuito para cargar la batería el siguiente elemento a considerar fue la celda solar.

Una celda solar es un dispositivo que transforma la energía solar en energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico. Cuando la luz que incide sobre un elemento semiconductor produce una diferencia de potencial, el cual a su vez es capaz de producir una corriente se conoce como efecto fotovoltaico [74].

A continuación, se muestran las curvas del comportamiento de la potencia y la corriente contra voltaje de una celda solar (Figura 55).

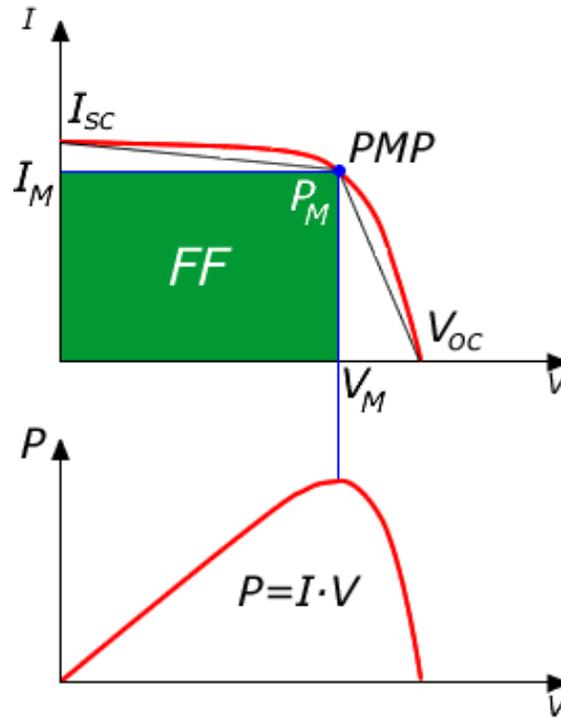


Figura 55. Curvas del comportamiento de la potencia y la corriente contra voltaje de una celda solar [75]

Donde:

- I_{SC} es la corriente en corto circuito
- V_{OC} es la tensión en circuito abierto
- I_M es la corriente de máxima potencia
- V_M es el voltaje de máxima potencia
- P_M es la potencia máxima
- FF es el factor de forma

Dos características muy importantes de una celda solar son el factor de forma y el punto de máxima potencia. El factor de forma indica la calidad del panel solar en términos energéticos, este se define como la relación entre la potencia máxima experimental de la celda solar y la potencia máxima teórica [75].

$$FF = \frac{P_M}{P_{TEO}} = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

El punto de máxima potencia es el producto del valor del voltaje y la intensidad máximos para los que la potencia entregada por la celda solar a una carga es máxima [75].

$$P_M = V_M \cdot I_M$$

La presencia de sombras, nubes, lluvia, neblina, el humo y el polvo reducen la intensidad con la que los rayos solares inciden en las celdas solares. Cuanto menor sea la incidencia de la radiación solar, menor será la potencia que la celda solar puede proporcionar (Figura 56) [76].

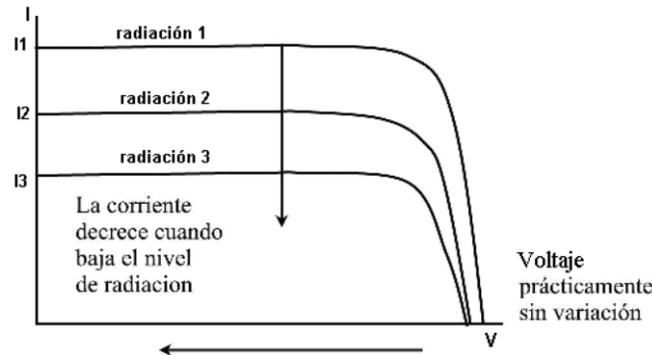


Figura 56. Curva corriente contra voltaje por efecto de la radiación solar [74]

Tras haber realizado una investigación del funcionamiento de las celdas solares, se realizó una comparación entre 3 celdas para seleccionar la que mejor se adaptara al circuito de carga de batería. En la (Tabla 14) se muestran las características de las celdas solares comparadas.

Tabla 14. Características de celdas de 1.2, 3 y 10 W

	Potencia [W]	Voltaje [V]	Corriente máxima [mA]	Precio [MXN]
Celda 1	1.2	5	180	93.00
Celda 2	3	6	500	256.00
Celda 3	10	12	800	491.00

Para seleccionar la celda que se implementó, en primer lugar, se consideró el voltaje con el que puede ser alimentado el circuito de carga de batería, el cual es de 4 a 8 V. Por esta razón la celda de 10 W fue descartada, ya que excede el límite de voltaje con el que se puede alimentar al circuito de carga de batería. Las celdas de 1.2 y 3 W pueden implementarse con el sistema de carga de baterías, sin embargo, la diferencia de la corriente que puede proporcionar la celda de 3 W respecto a la de 1.2 W es de 320 mA.

Tras haber realizado la comparación entre celdas solares, se seleccionó la que puede entregar de 3W de potencia, un voltaje de 6V y una corriente máxima de 500mA (Figura 57).

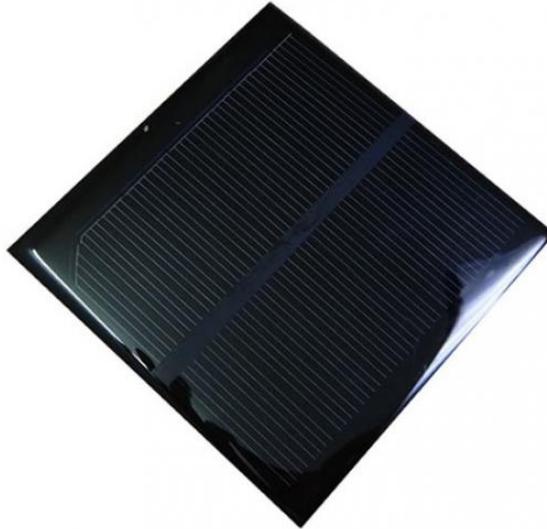


Figura 57. Celda solar 3 W [77].

Considerando la carga de 2.4Ah que puede proporcionar la batería, y los 500mA que proporciona la celda solar, se calculó que el tiempo de carga total de la batería en condiciones óptimas es de 4.8 horas. Sin embargo, debido al funcionamiento de una celda solar, no es posible obtener la máxima potencia que especifica el fabricante, por lo cual se realizó una prueba para obtener el tiempo que tarda en cargarse la batería que previamente fue seleccionada.

Para comprobar que el tiempo de carga fuera aproximadamente el calculado, se realizó una prueba durante 3 días. En primer lugar, se descargó la batería y posteriormente se inició la prueba de carga. Durante esta prueba se tomó el tiempo total que tardó en cargarse la batería. Los resultados se muestran en la (Tabla 15).

Tabla 15. Tiempo obtenido durante las pruebas de la carga de batería

	Condiciones del día	Hora de inicio	Hora de finalización	Porcentaje de aumento de tiempo
Día 1	Soleado con presencia de nubes en intervalos cortos de tiempo	10:00 a.m.	4:40 p.m.	38.88 %
Día 2	Soleado con presencia de nubes en intervalos cortos de tiempo	11:00 a.m.	5:10 p.m.	28.47 %
Día 3	Soleado con presencia de nubes en intervalos cortos de tiempo	10:40 a.m.	5:25 p.m.	40.62 %

En el primer día la prueba se inició a las 10 de la mañana y se registró que la hora en la que terminó de cargarse fue aproximadamente a las 4:40 de la tarde, es decir que la batería se cargó en un total de 6 horas y 40 minutos. Tras comparar los resultados, se encontró un aumento del 38.88% en el tiempo esperado a que la carga de la batería fuera total.

En el segundo día la prueba se inició a las 11 de la mañana y se registró que la hora en la que terminó de cargarse fue aproximadamente a las 5:10 de la tarde, es decir que la batería se cargó en un total de 6 horas y 10 minutos. Tras comparar los resultados, se encontró un aumento del 28.47% en el tiempo esperado a que la carga de la batería fuera total.

En el tercer día la prueba se inició a las 10:40 de la mañana y se registró que la hora en la que terminó de cargarse fue aproximadamente a las 5:25 de la tarde, es decir que la batería se cargó en un total de 6 horas y 45 minutos. Tras comparar los resultados, se encontró un aumento del 40.62% en el tiempo esperado a que la carga de la batería fuera total.

En promedio, se encontró un aumento del 35.99% en el aumento del tiempo de carga de batería comparado con el tiempo de 4.8 horas que previamente fue calculado, esto se debe a que no es posible obtener la máxima potencia que puede entregar la celda solar, ya que la radiación solar que incide en estas no es constante y varía según la hora del día.

Como se mencionó previamente, la batería seleccionada proporciona un voltaje de 3.7V, sin embargo, el sistema trabaja con un voltaje de 5V, por lo que fue necesario considerar una fuente conmutada elevadora de voltaje.

Una fuente conmutada es un dispositivo que se usa para alimentar a sistemas con un rango controlado de voltajes. La energía que entrega se hace mediante el uso de circuitos que emplean transistores, los cuales trabajan en conmutación a altas frecuencias. (entre 20 KHz y 50 KHz). La regulación del voltaje de salida se obtiene variando el tiempo de conmutación. Una fuente conmutada elevadora de voltaje tiene como objetivo aumentar el voltaje de entrada respecto al de la salida.

Para implementar la fuente conmutada elevadora de voltaje en el sistema de alimentación, se utilizó un módulo que cuenta con el circuito integrado MT3608 [78]. Siendo este un convertidor elevador de voltaje (Step-Up o Boost) destinado a uso en aplicaciones de baja potencia (no superiores a 300 mA). Usa una frecuencia fija, cuenta con una arquitectura de regulador de impulso de modo de corriente pico para regular el voltaje en la terminal de retroalimentación [78].

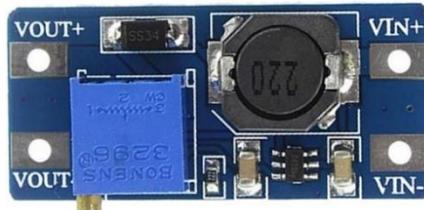


Figura 58. Modulo elevador de voltaje [79]

Una vez seleccionados los elementos, estos fueron conectados según el siguiente diagrama (Figura 59).

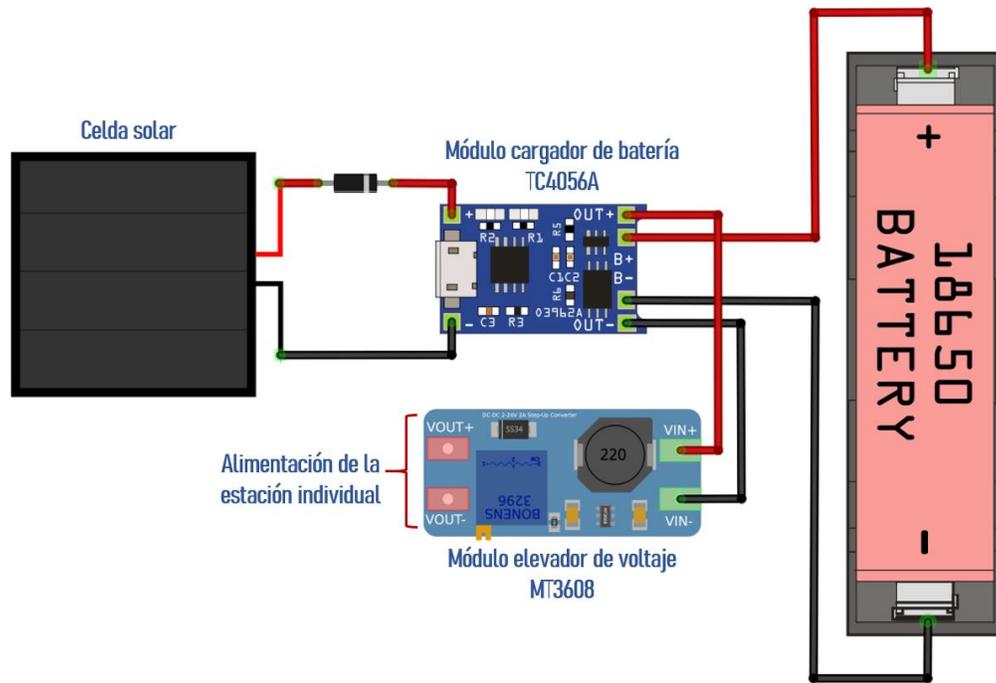


Figura 59. Diagrama de conexión del sistema de alimentación y carga de batería

5.4.6. Diagrama de la estación de monitoreo

El desarrollo de la estación de monitoreo se muestra en la (Figura 60), donde se realiza un diagrama utilizando el software libre fritzing.

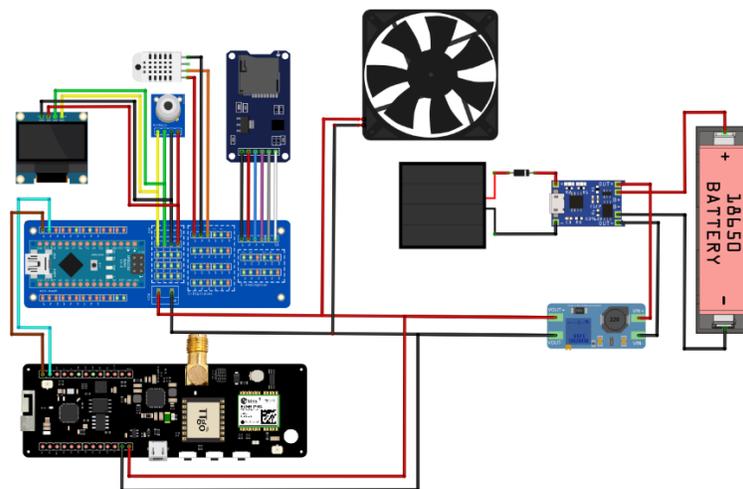


Figura 60. Diagrama de conexiones de las estaciones individuales

Este diagrama cuenta con 3 partes; 1) sistema de alimentación, 2) microcontrolador con sensores y datalogger y 3) dispositivo de comunicación. Adicionalmente tiene un ventilador para mantener regulada la temperatura de la estación y un display OLED en donde se muestran las condiciones de humedad, temperatura y el estado de la estación.

Descripción del diagrama

El display OLED utilizado cuenta con una resolución de 128x64 píxeles y un tamaño diagonal de 0,96 pulgadas. Cuenta con el controlador CMOS OLED/PLED SSD1306, el cual es utilizado en sistemas de visualización gráfica de matriz de puntos. Este circuito integrado está diseñado para el panel OLED de tipo de cátodo común, además, incorpora un control de contraste, una memoria RAM de pantalla y un oscilador, lo que reduce el número de componentes externos y el consumo de energía. En la comunicación con el microcontrolador puede utilizar la interfaz paralela compatible con la serie 6800/8000, la interfaz I2C o la interfaz SPI (Figura 61) [80].



Figura 61. Display OLED

Para integrar todos los elementos con el microcontrolador, se diseñó una tarjeta PCB (Printed Circuit Board), esta cuenta con conexiones para 5 dispositivos de comunicación I2C, 8 dispositivos digitales, 4 dispositivos analógicos, conexión para el módulo de tarjeta microSD (datalogger). Cuenta con un conector para alimentar el sistema y cuenta con pines para la alimentación de los elementos que se pueden conectar (Figura 62).

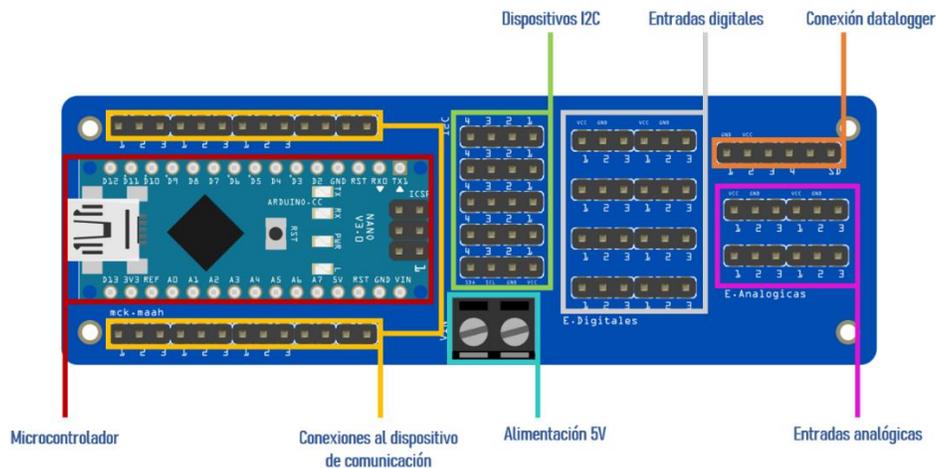


Figura 62. PCB diseñada

En la integración de todos los elementos de la estación de monitoreo, se diseñó un contenedor que fue manufacturado mediante impresión 3D (Figura 63).



Figura 63. Vistas laterales, superior y frontal del contenedor para la estación de monitoreo

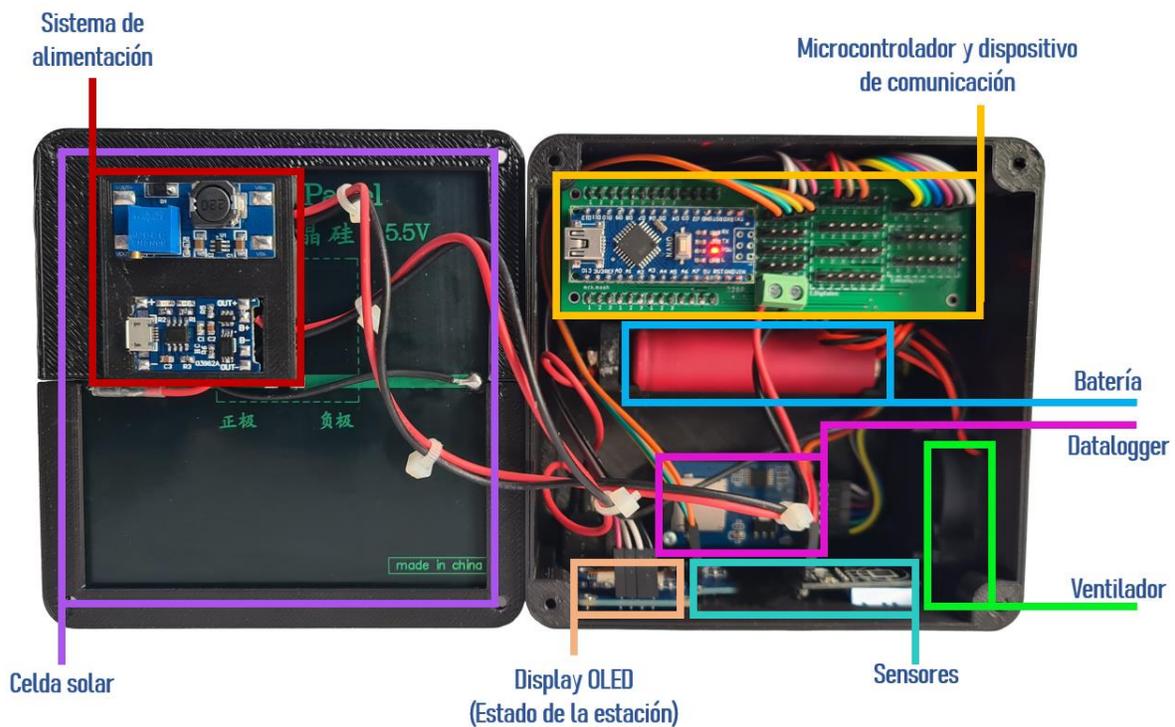


Figura 64. Vista interior de la estación de monitoreo

5.4.7. Desarrollo de la interfaz del usuario (Base central)

Se desarrolló una interfaz en Microsoft Visual Studio usando el lenguaje de programación C#, como complemento para la captura de datos, esta permite monitorear el estado de cada una de las estaciones implementadas en la red. En ella se pueden ver los datos de las variables que se están monitoreando, así como verificar si las estaciones se encuentran en condiciones óptimas o si necesitan mantenimiento.

La ventana principal de la interfaz cuenta con 5 partes. Cuenta con botones de conexión y desconexión con el dispositivo de comunicación que se encuentra en la base central (ICAT). Cuenta con una gráfica que muestra el estado de las variables de la red de monitoreo, cuenta con un menú de selección con 3 opciones:

- Inicio: Permite regresar a la ventana principal de la interfaz.
- Estaciones: Despliega un panel en el cual se puede seleccionar cuál estación se quiere monitorear de manera profunda.
- Info.: Muestra información de la versión del software.

Cuenta con un panel en el que se muestra si las estaciones se encuentran en funcionamiento o si presentan alguna anomalía.

Finalmente cuenta con un cuadro en dónde se indica si el sistema se encuentra conectado, desconectado y a qué puerto COM de la computadora se encuentra conectado (Figura 65).



Figura 65. Ventana principal de la Interfaz desarrollada en Microsoft Visual Studio

Al seleccionar la pestaña “Estaciones” y tras haber elegido una, la interfaz muestra las condiciones de las variables que están siendo monitoreadas. De igual manera se pueden observar los datos en una gráfica y adicionalmente se pueden exportar los datos para poder ser analizados de manera independiente. Cuenta con un cuadro en donde se indica si la estación se encuentra en funcionamiento o si requiere mantenimiento y adicionalmente se muestra la intensidad de la de señal de la estación (Figura 66).



Figura 66. Ventana de la estación seleccionada

6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA PARA LA EVALUACIÓN DE UN POSIBLE INCENDIO FORESTAL, PRUEBAS Y RESULTADOS

6.1. Prueba de comunicación inalámbrica

Una vez desarrolladas las estaciones individuales de monitoreo, se realizó una prueba para la comunicación inalámbrica, para ello se situó la estación E3, de las 15 las estaciones que conforman la red, ésta se encuentra a 1.2 km de distancia de la estación receptora E0 (Figura 67).

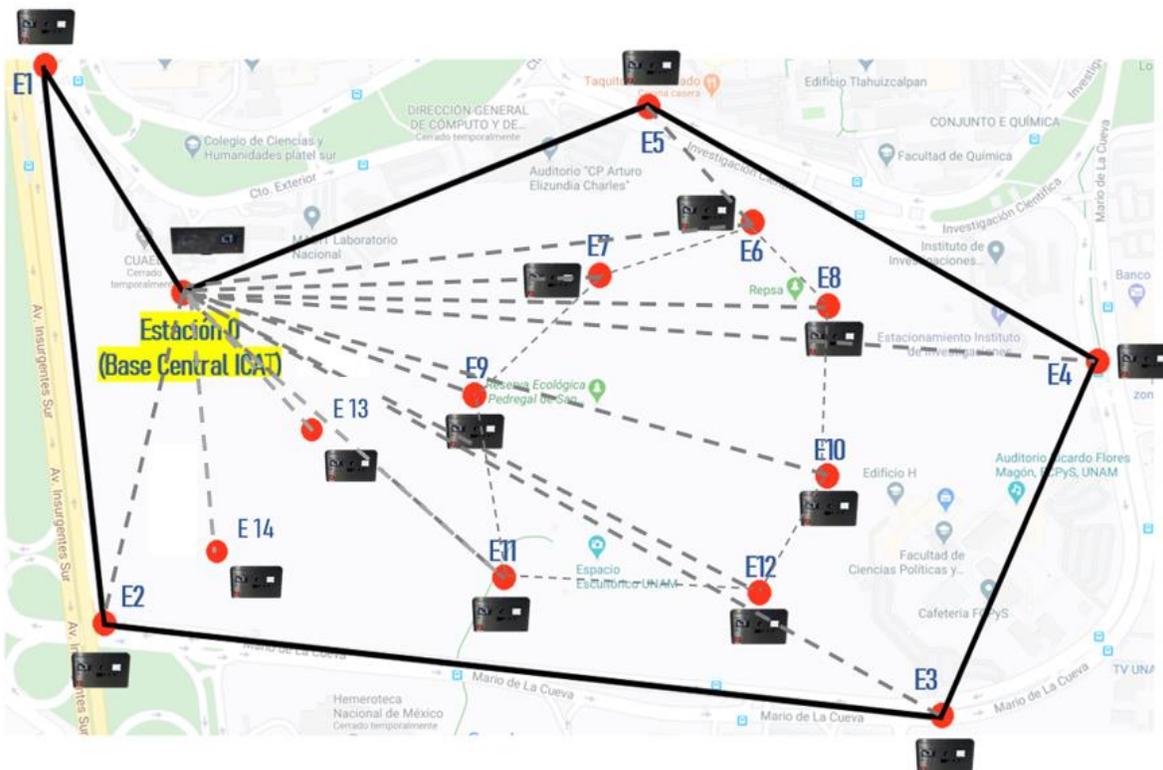


Figura 67. Red de estaciones de monitoreo en el núcleo 3 de REPSA

Una característica con la que cuenta el dispositivo de comunicación es la posibilidad de mostrar el valor de la intensidad de la señal durante la transmisión de datos.

En la tabla 4 se muestra la intensidad de la señal del dispositivo de comunicación durante la transmisión de datos que se obtuvieron a diferentes distancias.

Tabla 16. Tabla de distancias e intensidad de la señal del dispositivo de comunicación sin obstáculos

Distancia [m]	Intensidad de la señal
0	0
200	18
400	35
600	51
800	69
1000	86
1200	103
1400	121
1600	137
1800	155
2000	172

Las condiciones en las cuales se hicieron estas pruebas fueron en un espacio abierto y con la menor cantidad de obstáculos posibles.

Se realizó una segunda prueba de igual manera en espacio abierto pero esta vez con obstáculos, los resultados fueron los mostrados en la tabla 5.

Tabla 17. Tabla de distancias e intensidad de la señal del dispositivo de comunicación con obstáculos

Distancia [m]	Intensidad de la señal	Porcentaje de incremento [%]
0	0	0
200	35	94.44
400	52	48.57
600	74	45.09
800	87	26.08
1000	103	19.76
1200	127	23.30
1400	141	16.52
1600	153	11.67
1800	175	12.90
2000	189	9.88

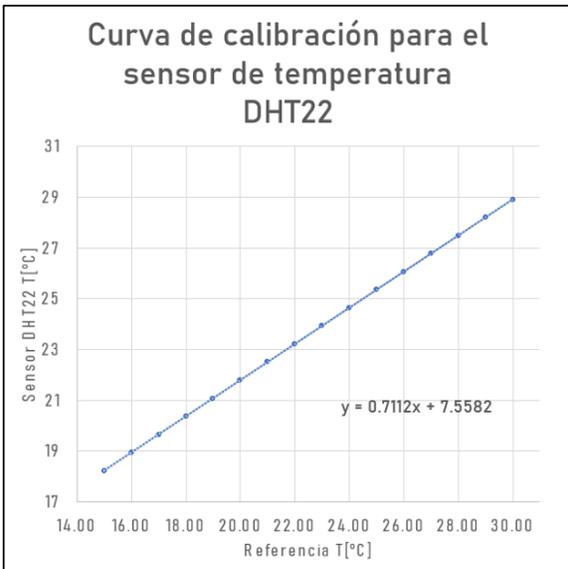
Como se puede observar en la tabla 5, el incremento que se obtuvo al realizar la prueba en espacio abierto con obstáculos fluctúa entre el 10 y el 50% a excepción de la distancia de 200 m en donde su valor incrementó un 94%. El incremento que se obtuvo en los valores de la intensidad de la señal respecto a la prueba en un espacio abierto y con la menor cantidad de obstáculos, no afectó la comunicación entre emisor y receptor puesto que los datos se pudieron recabar de manera constante y sin pérdida de señal.

Tras haber verificado el correcto funcionamiento entre la base central y una de las estaciones de monitoreo, esta se integró con la interfaz previamente desarrollada.

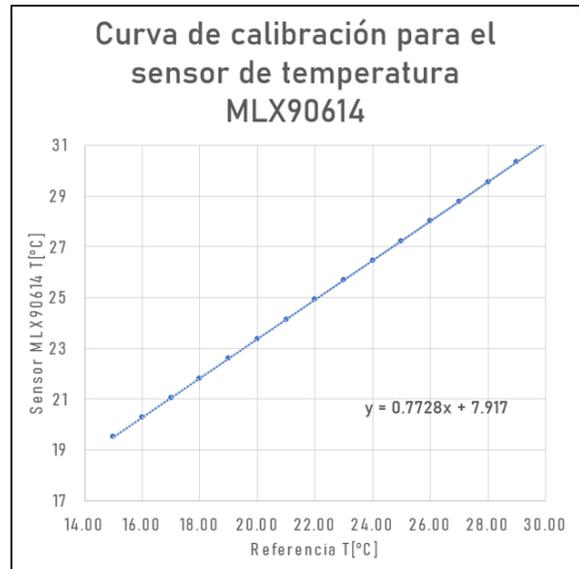
6.2. Calibración de los sensores

Hoy en día existen diversos sensores que pueden ser conectados directamente a un microcontrolador para tomar mediciones de forma inmediata. Sin embargo, los sensores han sido diseñados y probados para medir las condiciones del lugar en donde han sido desarrollados, lo cual puede causar una desviación en los resultados bajo diferentes condiciones. Por lo tanto, es necesario realizar una calibración de los sensores bajo las condiciones de la región en la que se van a utilizar [81].

En la calibración de los sensores se utilizó el método por comparación directa. Este método consiste en comparar directamente mediciones obtenidas por el equipo a calibrar contra los valores proporcionados por un equipo patrón de referencia [82]. Las mediciones obtenidas por ambos equipos son registradas para posteriormente encontrar la desviación entre las mediciones obtenidas. Para esta tarea se tomaron mediciones de un día completo durante 30 días, posteriormente se generaron las gráficas de las variables y se utilizó el método de mínimos cuadrados para obtener su compensación (Figura 68, Figura 69).



a)



b)

Figura 68. a) Curva de calibración del sensor de temperatura DHT22, b) Curva de calibración del sensor de temperatura MLX90614

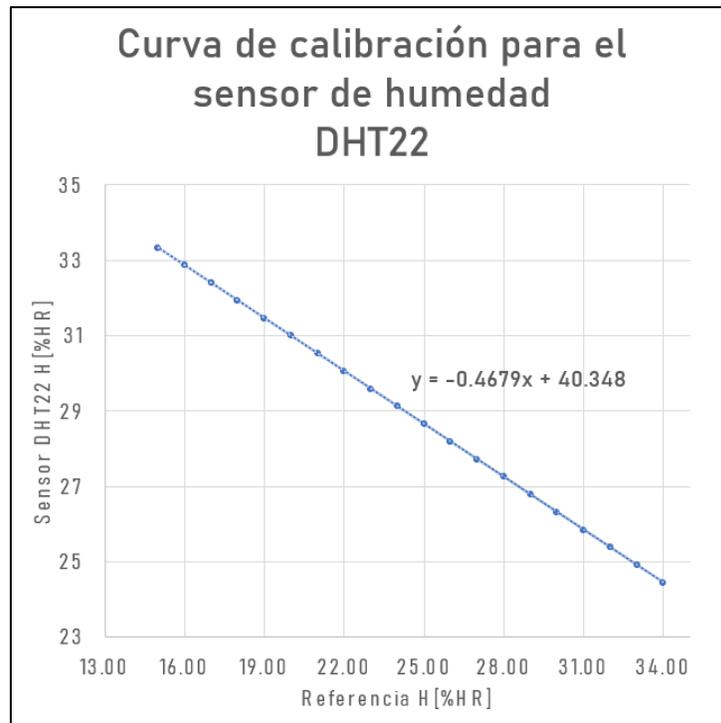


Figura 69. Curva de calibración para el sensor de humedad

Las ecuaciones de ajuste que fueron obtenidas para los sensores de humedad y temperatura fueron las siguientes:

- $\text{Temp}_{\text{DHT22}} = 0.7112x + 7.5582$
- $\text{Temp}_{\text{MLX90614}} = 0.7728x + 7.917$
- $\text{Humedad} = -0.4679x + 40.348$

6.3. Puesta en marcha y pruebas de funcionalidad del sistema de monitoreo

Para probar el correcto funcionamiento de la interfaz con una de las estaciones y la base central, esta se conectó para comprobar que el sistema en conjunto trabajara de manera correcta.

El primer punto que se comprobó fue la comunicación entre la base central y la estación individual. Para esta prueba la distancia fue de 1.2 Km con presencia de obstáculos, el valor de intensidad de la señal tenía un valor de 127, este indicaba que la comunicación era adecuada y no se presentó ninguna pérdida de datos.

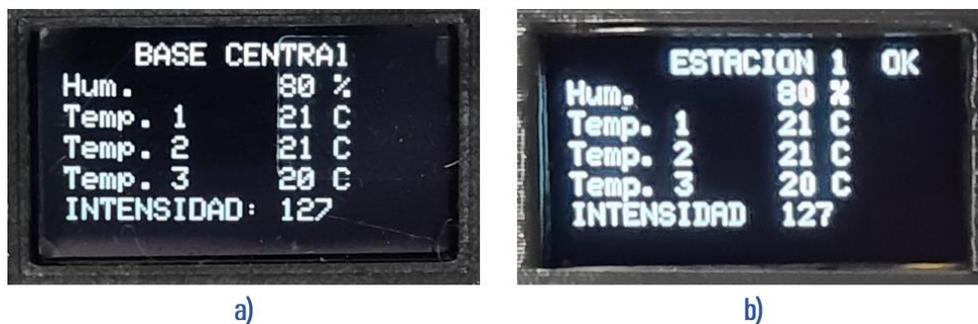


Figura 70. Display OLED a) Base Central b) Estación 1

Para comprobar el correcto funcionamiento de la interfaz con una de las estaciones, esta se conectó para iniciar una prueba durante una semana. Durante este periodo de tiempo, la comunicación entre estación y base central fue estable, no se registró ninguna intermitencia en la transmisión de datos, el valor de la intensidad de la señal se mantuvo entre 121 y 130. En esta prueba también se tomaron mediciones de los sensores de humedad y temperatura. El periodo de tiempo entre cada uno de los datos fue de 15 segundos y cada dato obtenido fue registrado con un solo decimal.

Los datos de humedad y temperatura que se registraron fueron graficados para observar el comportamiento que se tuvo durante la prueba (Figura 71, Figura 72, Figura 73).

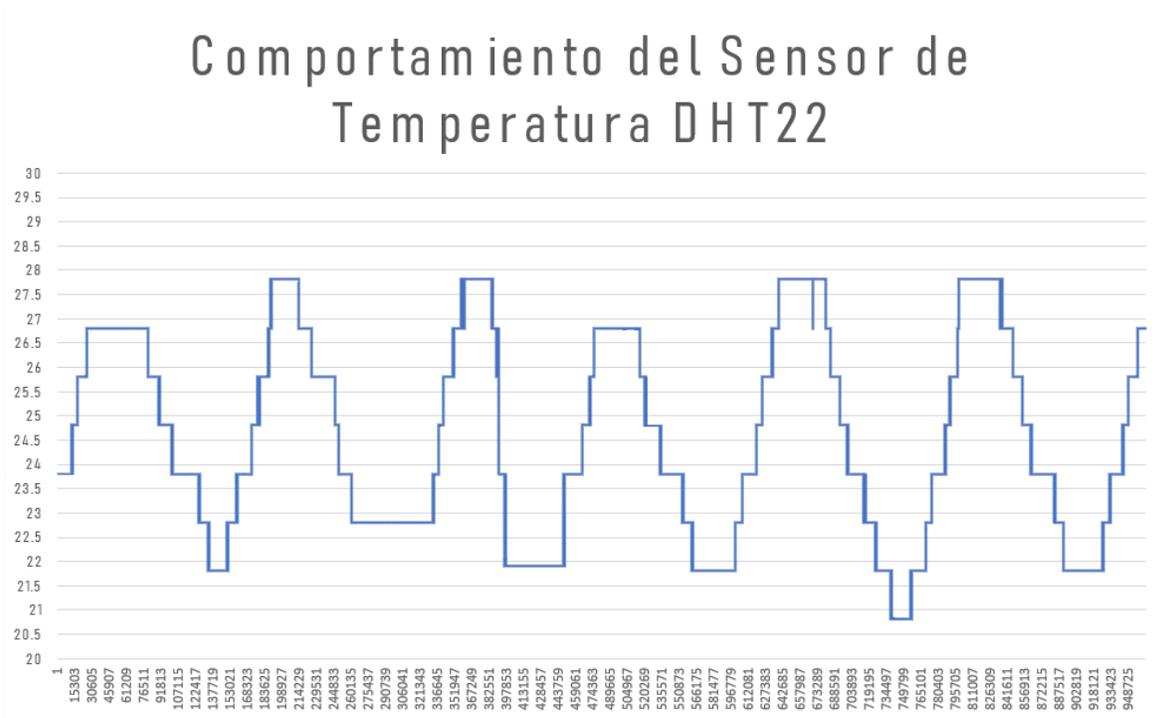


Figura 71. Comportamiento del sensor de temperatura DHT22

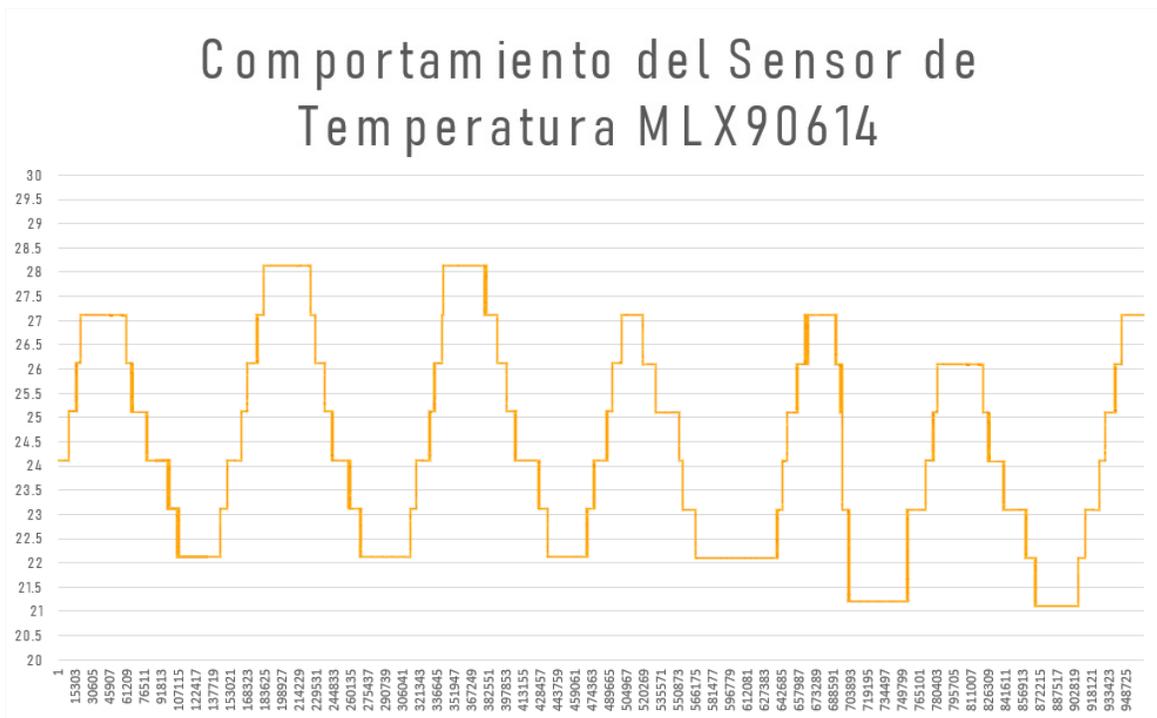


Figura 72. Comportamiento del sensor de temperatura MLX90614

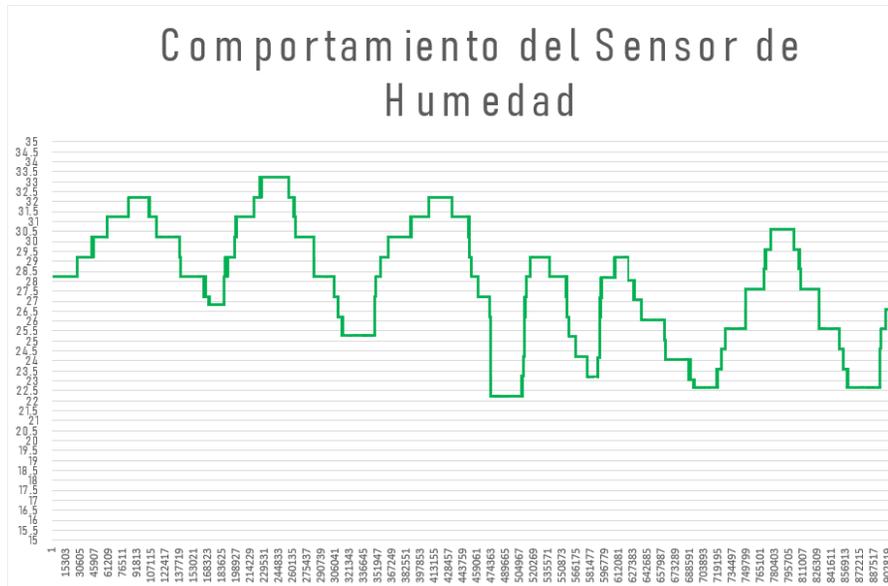


Figura 73. Comportamiento del sensor de humedad

El comportamiento escalonado que se observa en las gráficas obtenidas se debe a dos factores, al periodo de tiempo entre cada dato obtenido y a la resolución de los sensores. Este comportamiento podría verse mejorado si el tiempo entre la toma de datos es menor a 15 segundos y si la resolución de los sensores es mayor.

Con las gráficas se observó que el comportamiento de los sensores se mantuvo constante, además de que se presentó un patrón similar.



Figura 74. Ventana de interfaz durante la prueba de una semana

6.4. Análisis de datos

En el análisis de la información registrada, se implementó un análisis de lógica difusa. Esta técnica cuenta con la capacidad de tomar decisiones en tiempo real, incluso sin la necesidad de contar con toda la información de la tarea con la que se está trabajando. La lógica difusa trabaja con las variables lingüísticas de forma natural en lugar de las variables lógicas, por lo tanto, es adecuada para tareas que cuentan con incertidumbre. Adicionalmente, en esta técnica es posible agregar diferentes condiciones, esto con el fin de producir el resultado adecuado [49], [51], [52], [53]. También cuenta con la característica de ser intuitiva, ya que imita la forma de pensar de las personas y puede ajustarse para trabajar en diversas tareas [83].

En los datos registrados por las estaciones individuales de monitoreo, pueden presentarse algunas imprecisiones que se relacionan con las condiciones ambientales en las que se realiza el monitoreo de las variables meteorológicas, por lo que el análisis mediante lógica difusa puede ser manejado con esta técnica. A su vez, el resultado obtenido es preciso y robusto, ya que las variables monitoreadas se definen por datos obtenidos en tiempo real [82]. Mediante esta técnica, es posible realizar una estimación a corto plazo del riesgo que puede presentar un incendio forestal, permitiendo mejorar el tiempo de respuesta con el que los equipos de prevención y detección de incendios forestales responden a este fenómeno [49]. Como ventajas de la técnica de lógica difusa, se puede destacar el tiempo corto de ejecución además de que requiere un proceso matemático menor en comparación a otras técnicas [52].

En el desarrollo del sistema difuso, se consideró un sistema de niveles de riesgo de incendios, esto con el fin de homogeneizar las variables con las que se trabajaron, además, esto permite presentar criterios para el estudio de los incendios forestales. Los niveles de riesgo de incendios se basan en el semáforo de Karl Lewinsking (Figura 75).

Descripción	Riesgo			
	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Temperatura	Hasta 25°C	Hasta 30°C	De 30°C a 36°C	Arriba de 36°C
Humedad Relativa	Hasta 50%	Hasta 40%	Menos del 20%	Abajo del 10%
Velocidad del viento	De 0 a 10 km/h	De 10 a 20 km/h	Arriba de 20 km/h	Más de 30 km/h
Vegetación (combustible)	Semi - Húmeda	Seca	Seca o muy seca	Muy Seca
Cielo	Nublado	Nublado a medio nublado	Soleado a medio nublado	Soleado
Status	Favorable	Pre - Alerta	Alerta	Alerta
Semáforo	Verde	Ámbar	Rojo	Situación crítica Roja
Acciones	Monitoreos normales, vigilancia de rutina, prevención de: Rutina	Monitoreos y medidas detección constantes, vigilancia permanente, prevención: Constante	Monitoreo intenso detección intensa y constante de todas las áreas críticas vigilancia permanente, Prevención: Urgente	Monitoreo Constante, comunicación intensa con municipios y vigilancia extrema prevención: Medidas Extremas

Figura 75. Semáforo de Karl Lewinsking [84]

El semáforo de Karl Lewinsking es una de las herramientas que se utiliza para evaluar el peligro de incendios forestales en los protocolos del CENAPRED, CONABIO y CONAFOR [85]. Está definido en intervalos para la humedad, temperatura, velocidad del viento, vegetación, y condiciones del cielo.

Este semáforo nos permite conocer las variables de entrada y de salida, por eso, por las características que tiene la lógica difusa podemos integrarlos al sistema conceptual de la (Figura 37).

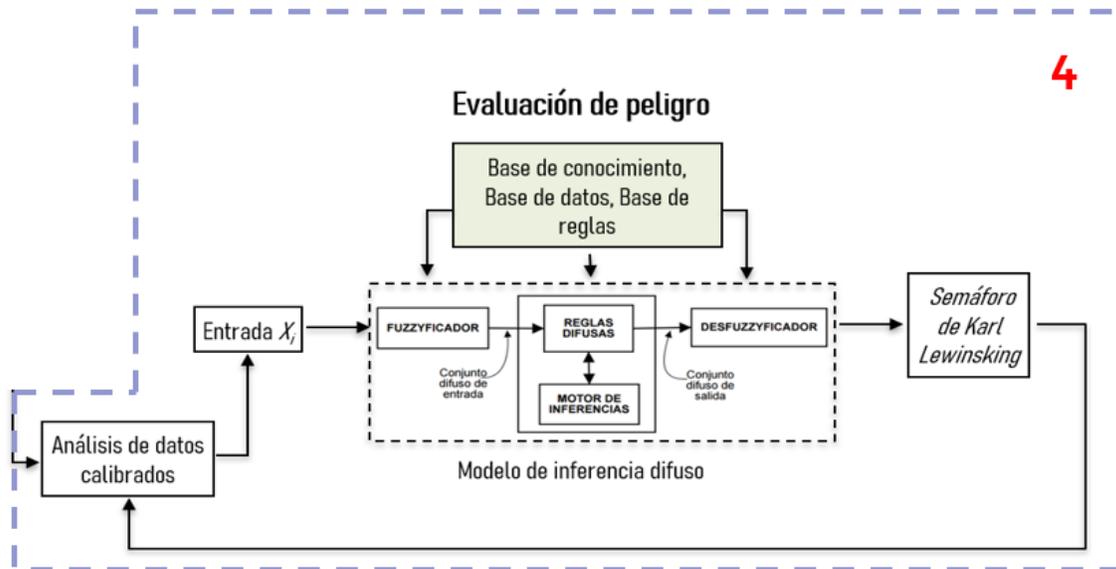


Figura 76. Sistema de lógica difusa

Debido a que las variables con las que se desarrolló el sistema fueron la humedad y la temperatura, estas fueron seleccionadas para ser caracterizadas por su correspondiente conjunto difuso.

Para las variables de entrada se definieron 2 conjuntos difusos (Figura 77).

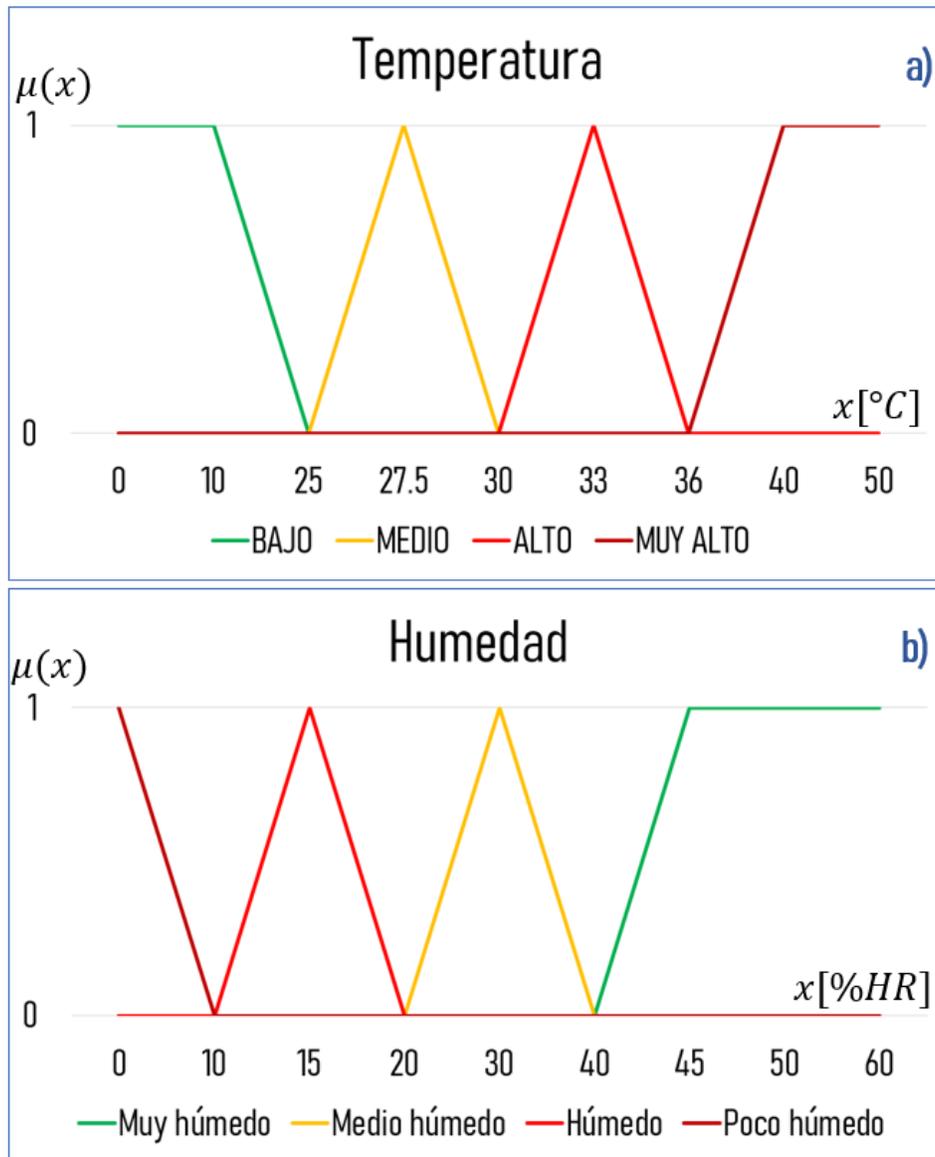


Figura 77. Variables de entrada; a) Conjuntos difusos para la temperatura, b) Conjuntos difusos para la humedad

A la salida del sistema se obtuvo una respuesta en donde se proporciona el nivel del peligro (Figura 78).

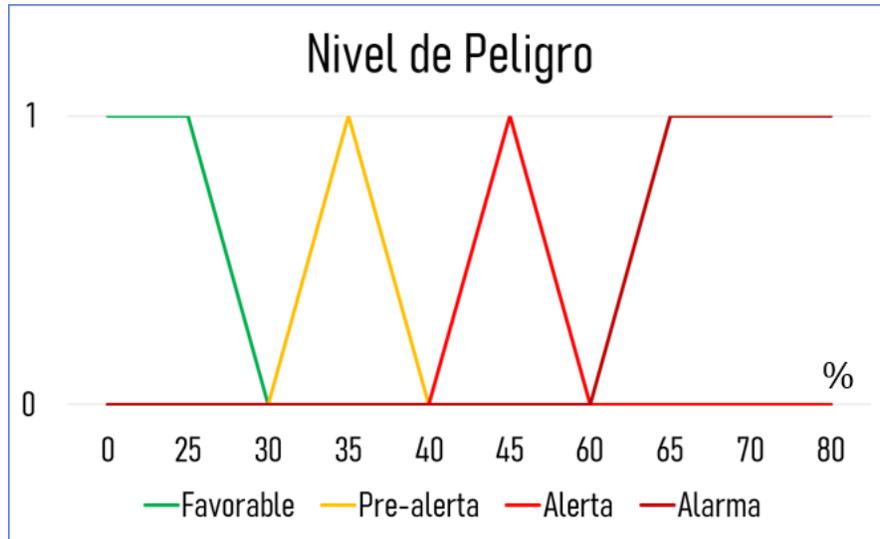
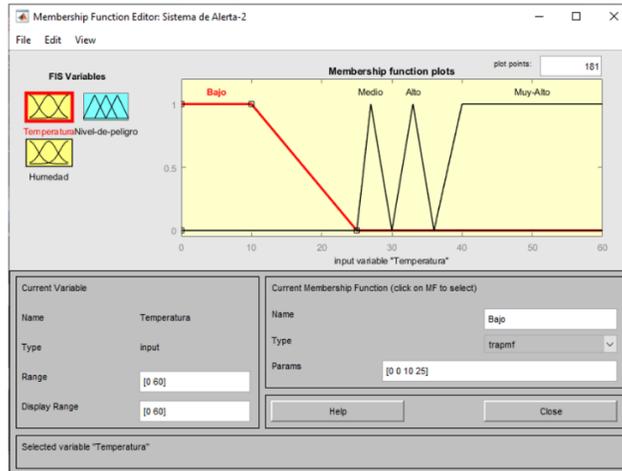


Figura 78. Variable de salida, nivel de peligro

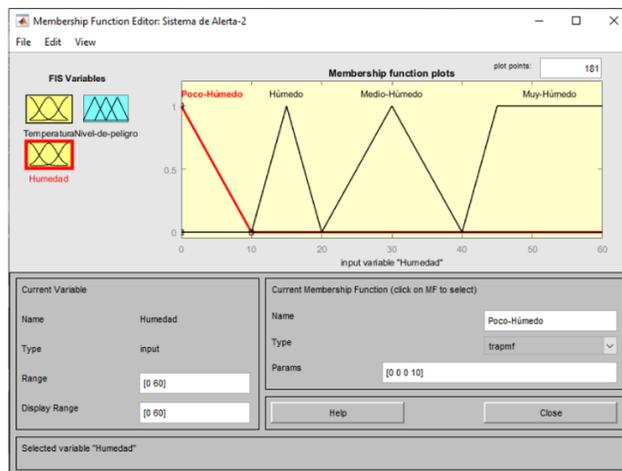
Los datos con los que trabajó el sistema de lógica difusa son recopilados por las estaciones individuales de monitoreo. A su vez, estos alimentan al motor de inferencia borrosa para inferir la posibilidad de un incendio forestal.

El sistema contó con los registros de las variables de humedad y temperatura según la estación del año en la que hayan sido recabados. Cuenta con un registro de todos los eventos que han podido suscitarse. Por último, contó con la información de las coordenadas de la ubicación de cada estación meteorológica a implementar. El sistema de lógica difusa contó con 4 partes, la base de reglas, el fusificador, salida del fusificador y el defusificador.

En la implementación de análisis de datos se utilizó la herramienta de sistemas difusos en MATLAB. Esta herramienta proporciona precisión, flexibilidad y escalabilidad en comparación a otras herramientas. Para ello fue necesario agregar las variables de entrada y la variable de salida que previamente ya fueron definidas en la (Figura 76) y (Figura 77). Al ser definidas en la herramienta se obtuvieron graficas similares a las que previamente fueron diseñadas (Figura 79 y Figura 80).



a)



b)

Figura 79. Variables de entrada en MATLAB; a) Conjuntos difusos para la temperatura, b) Conjuntos difusos para la humedad

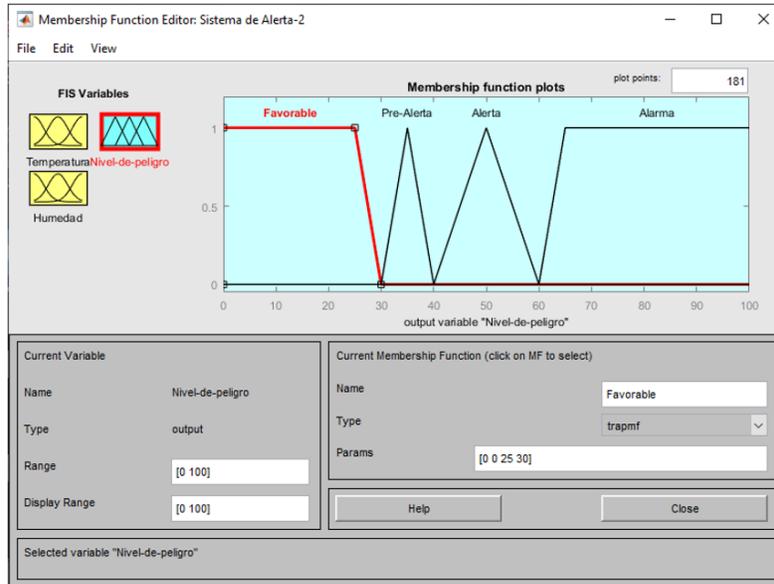


Figura 80. Variable de salida en MATLAB, nivel de peligro

Fue necesario también definir las reglas para indicar al sistema si este se encontraba en estado favorable, prealerta, alerta o alarma según las condiciones de la humedad y temperatura (Figura 81).

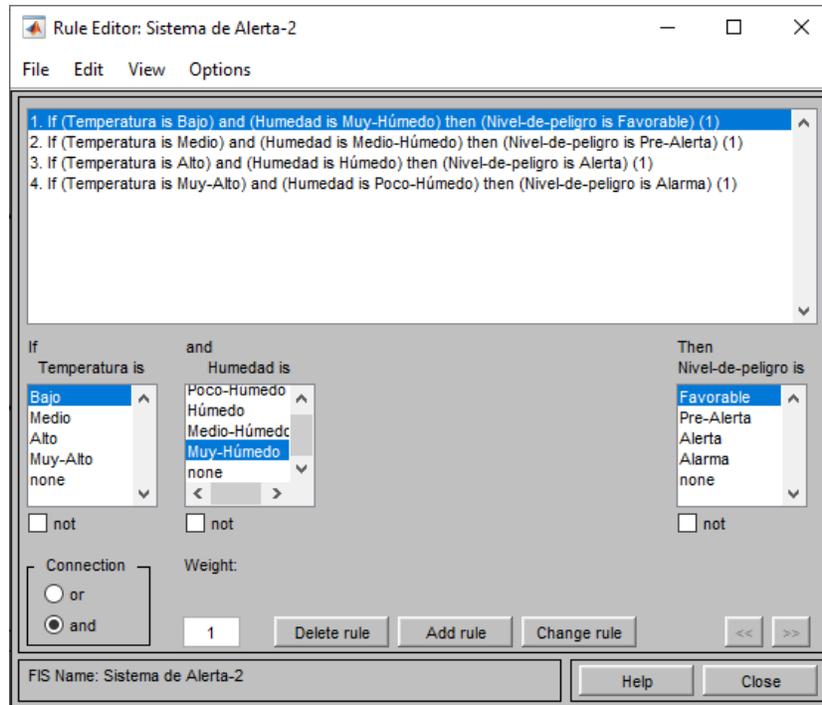


Figura 81. Reglas implementadas en el sistema difuso

Las condiciones implementadas fueron las mostradas en la Tabla 6.

Tabla 18. Tabla de condiciones para el sistema de Alerta

Estado de la Temperatura	Estado de la Humedad	Estado del sistema
$T < 25$	$H > 40$	Favorable
$25 < T < 30$	$20 < H < 40$	Prealerta
$30 < T < 36$	$10 < H < 20$	Alerta
$T > 36$	$H < 10$	Alarma

Una vez diseñado el sistema difuso, este fue probado para verificar que su funcionamiento fuera el esperado.

La herramienta permitió seleccionar las condiciones de las variables de entrada y nos proporcionó el valor de la variable de salida. Cuando se tiene una temperatura baja (25 °C) y una humedad relativa baja (14 %HR), se tiene un nivel de peligro del 50 %, lo cual nos indicaría que el sistema se encuentra en estado de alerta (Figura 82).

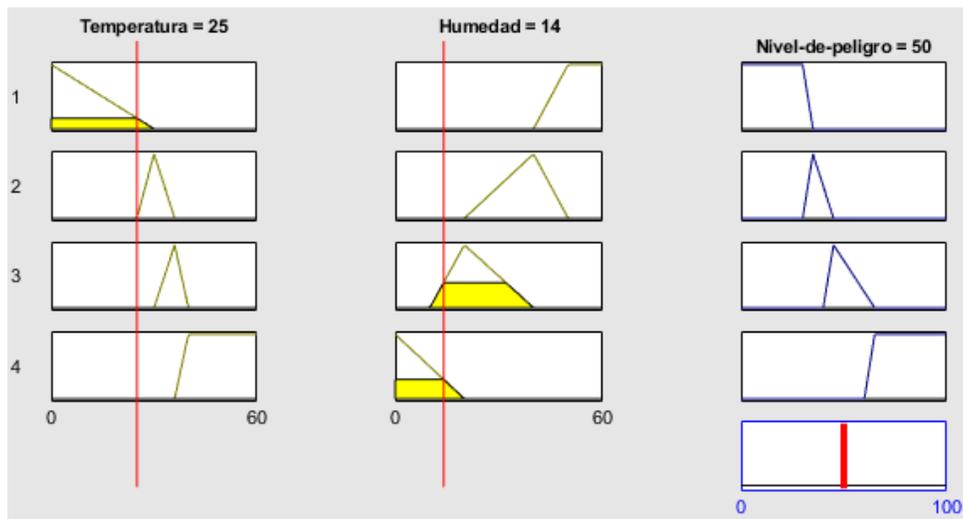


Figura 82. Condiciones de Temperatura alta y Humedad baja

Cuando se tiene una temperatura baja (20 °C) y una humedad relativa media (60 %HR), se tiene un nivel de peligro del 16.8 %, lo cual nos indicaría que el sistema se encuentra en estado de favorable (Figura 83). Esto se muestran de forma integrada en la (Figura 84).

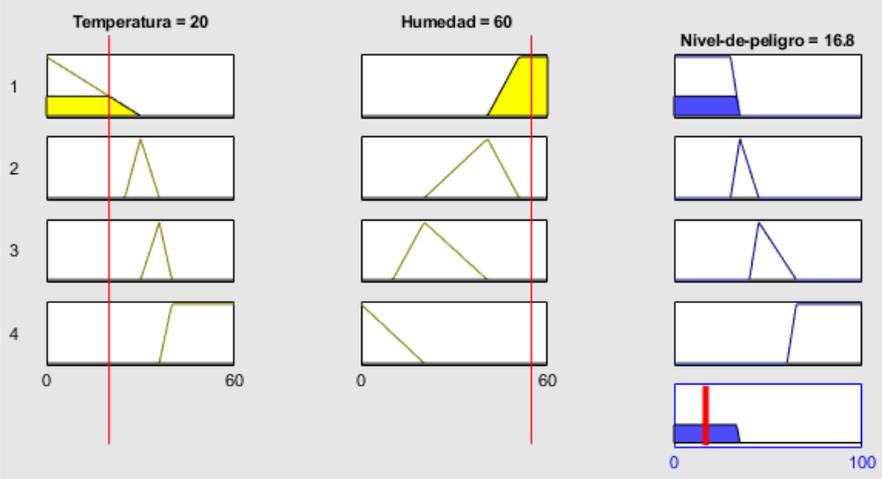


Figura 83. Condiciones de Temperatura baja y Humedad alta

Adicionalmente se pudo obtener una gráfica tridimensional del sistema diseñado, donde se puede visualizar el nivel de peligro respecto a los valores de humedad y temperatura (Figura 84).

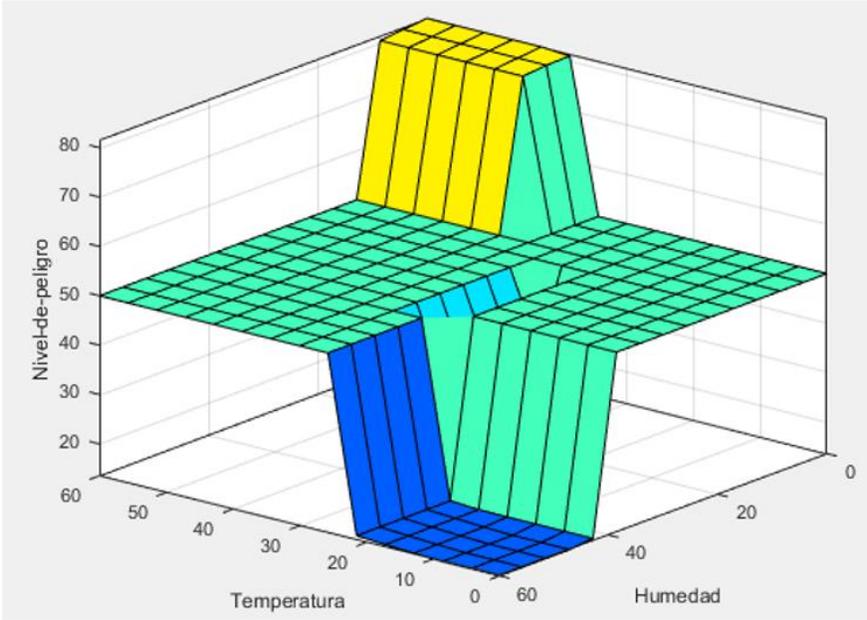


Figura 84. Representación tridimensional del sistema difuso

6.5. Sistema de alerta la evaluación de un posible incendio forestal desarrollado

El sistema de alerta desarrollado inicia con la obtención de datos mediante la red de estaciones meteorológicas. Los datos son enviados a la base central E0, que se encuentra en el ICAT, mediante comunicación inalámbrica entre la red de estaciones y la estación central localizada en el ICAT. Los datos de cada estación se exportan para posteriormente ser analizados con el sistema de lógica difusa implementado, este a su vez proporciona el estado de la red de estaciones (favorable, prealerta, alerta o alarma).

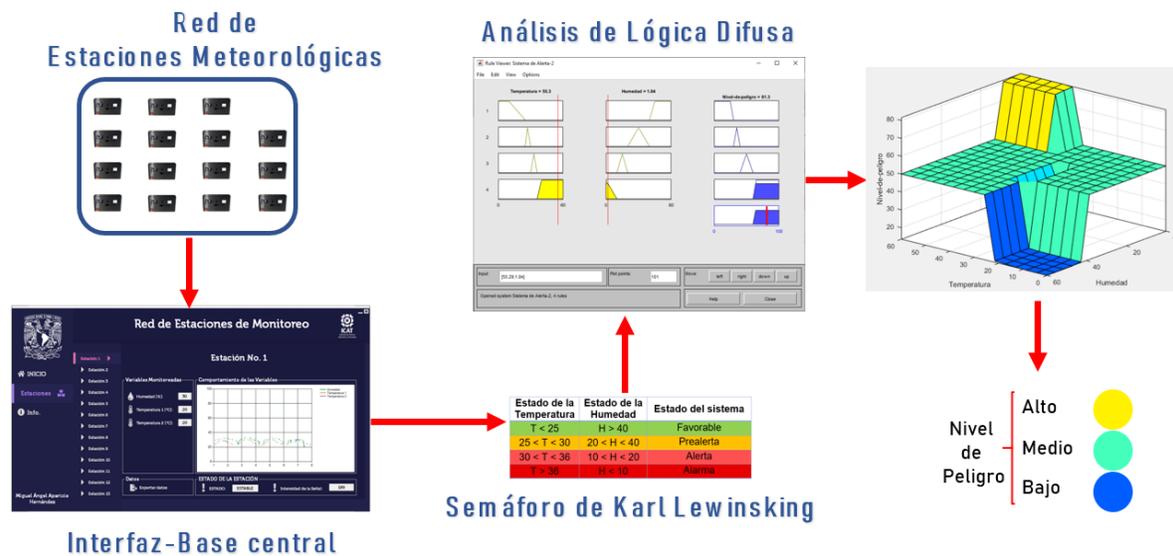


Figura 85. Sistema de alerta para la evaluación de un posible incendio forestal desarrollado

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En este trabajo de tesis se desarrolló un sistema instrumental basado en redes inalámbricas para la evaluación del peligro de incendios forestales. Al considerar como caso de estudio la zona núcleo oriente de la REPSA, y tras haber realizado un estudio de los incendios registrados, así como de la vegetación presente, permitió desarrollar y proponer una red de estaciones inalámbricas que se ubicarán en diferentes puntos estratégicos.

En el desarrollo del sistema propuesto, se implementó un algoritmo en MATLAB para determinar la ubicación y el número de puntos estratégicos utilizados en la red de monitoreo inalámbrica. Inicialmente el algoritmo ubicó 85 puntos, los cuales, tras realizar un proceso de optimización, el número de estaciones se redujo un 82%, se obtuvieron finalmente 15 puntos estratégicos. Los puntos encontrados se ubican en las zonas en donde se tiene el registro previo de incendio forestal y la presencia de vegetación, además estos permiten monitorear el 100% del área de trabajo.

El trabajar con puntos estratégicos, dan una ventaja sobre los sistemas que realizan un monitoreo en puntos aleatorios, ya que estos permiten no solo monitorear áreas de alto riesgo dentro de la zona de trabajo, sino que también permiten aumentar hasta un 40% la cobertura del área bajo observación.

En cada punto estratégico encontrado, se propone ubicar una estación individual de monitoreo. Esta permite monitorear las variables meteorológicas de humedad y temperatura. Como ventaja sobre otras estaciones existentes, tiene la posibilidad de agregar más sensores que se llegaran a necesitar en un futuro. Cuenta con un sistema de almacenamiento de datos, lo cual permite tener un respaldo de la información que se registrará durante el tiempo en que se colocarán las estaciones. Cuenta con un sistema de alimentación y carga de baterías solar, lo cual es una ventaja, ya que permite ubicar las estaciones en zonas en donde no se cuenta con una red eléctrica, además de que da a las estaciones individuales autonomía, permitiendo que trabajen las 24 horas del día.

Tras obtener la ubicación de los 15 puntos estratégicos (encontrados por el algoritmo), y al hacer la medición entre ellos, se determinó que el protocolo adecuado para implementar un sistema de comunicación inalámbrica era el protocolo de red LoRaWAN. Al implementar este protocolo, y tras haber realizado pruebas de funcionamiento, se encontró una eficiencia superior al 85% en comparación a otros protocolos de comunicación que generalmente son implementados, ya que con este no se presentó alguna intermitencia en la comunicación entre una estación de prueba y otra, tampoco hubo pérdida de datos

y tiene la ventaja de poder ser implementado en zonas amplias, ya que este protocolo puede llegar a tener un alcance de hasta 15 km de distancia.

Adicionalmente, el sistema de monitoreo desarrollado cuenta con una interfaz gráfica, esta permite el monitoreo de las variables de cada estación dentro de la red inalámbrica en tiempo real, además de que permite verificar si cada una de ellas se encuentra en correcto funcionamiento. Mediante la interfaz, se puede obtener la información que ha sido registrada por cada una de las estaciones individuales de monitoreo. Con la información obtenida, es posible realizar un posterior análisis y verificar el estado de la zona monitoreada, con ello se puede decir si se encuentra en estado favorable, prealerta, alerta o alarma.

En el sistema propuesto, se implementó un análisis de datos por lógica difusa, debido a que cuenta con la capacidad de tomar decisiones en tiempo real, sin la necesidad de contar con toda la información sobre el evento con el que se está trabajando. Esta técnica trabaja con las variables lingüísticas de forma natural, tal que es adecuada para tareas con incertidumbre. También, puede ser utilizada para combinar un diferente número de reglas, esto con el fin de obtener el resultado que se adecúe a la tarea con la que se está trabajando. Al agregar la lógica difusa al sistema propuesto, permitió crear un sistema de alerta fiable y con facilidad de ser escalable a una tarea de mayores requerimientos, además de que el sistema propuesto, cuenta con la posibilidad de realizar una estimación de la presencia de un incendio forestal de forma inmediata, lo cual ayuda a mejorar el tiempo de respuesta con el que los equipos de prevención y detección de incendios forestales pueden responder a este fenómeno.

En el análisis de lógica difusa se trabajó con el semáforo de Karl Lewinsking, en éste se categorizan los niveles de las variables meteorológicas que fueron utilizadas. El uso de este semáforo permitió utilizar un conjunto de reglas que ya han sido implementadas en sistemas de alerta de incendios forestales y que han mostrado resultados altamente favorables, además de que las reglas que se establecen en este semáforo pueden ser implementadas en sistemas de lógica difusa, ya que cuentan con la estructura de las reglas que se establecen en este sistema de análisis.

En el análisis de datos se utilizó la herramienta de lógica difusa del software MATLAB, ya que permite mostrar el estado del sistema en tiempo real, pudiendo determinar si se activa una alerta de cambio de nivel de peligro, además de que esta herramienta proporciona precisión, flexibilidad y escalabilidad en comparación a otras.

Trabajo a futuro

Tras realizar pruebas de mayor duración, se espera mejorar las estaciones de monitoreo, agregando sensores que permitan el monitoreo de variables que pueden estar relacionadas con la presencia de un incendio forestal, como lo es la presencia de gases y partículas que se generan por la combustión de biomasa.

Con los datos obtenidos por la red de monitoreo, se espera realizar un registro anual de las condiciones en la REPSA, esto ayudaría a generar líneas de tiempo que permitan a futuras investigaciones, entender por qué se presenta un fenómeno como lo es un incendio forestal, en qué condiciones, e incluso si se presentan repetidamente en periodos específicos del año. Estos registros permitirían evaluar la amenaza que presenta un incendio forestal y como resultado se podrían generar planes de contingencia.

Se espera también que los registros obtenidos, permitan mostrar cuales han sido las repercusiones de los incendios forestales en el ecosistema de la REPSA (flora y fauna).

8. ANEXOS

8.1. Análisis de datos utilizando inteligencia artificial

La clasificación y categorización de datos para conocer niveles de resultados, generar semáforos y toma de decisiones se realiza actualmente a través de la inteligencia artificial, con aplicaciones en distintas ramas de la ciencia y la tecnología, en particular en el monitoreo de fenómenos naturales.

8.1.1. Inteligencia artificial

La inteligencia artificial puede ser definida como el estudio de la informática que se centra en el desarrollo de software o máquinas que presentan una inteligencia similar a la humana. Sus objetivos principales abarcan la deducción, el razonamiento, la representación de conocimiento, la planificación, el procesamiento del lenguaje natural, el aprendizaje, la percepción y la capacidad de manipular objetos. A largo plazo se pretende lograr la creatividad, la inteligencia social y la inteligencia general a nivel humano [86].

Dentro de la inteligencia artificial se pueden encontrar distintas ramas, entre ellas las que más destacan son el deep learning y el machine learning.



Figura 86. Representación de las redes neuronales convolucionales [87]

8.1.2. Machine Learning

El término Machine Learning se refiere a la detección automatizada de patrones significativos en los datos. Este se encarga del diseño y del estudio de las herramientas que hacen uso de la experiencia pasada para poder tomar decisiones futuras, su objetivo principal es generalizar o inducir una regla desconocida a partir de ejemplos donde dicha regla es aplicada. El Machine Learning combina conceptos y técnicas de diferentes áreas del conocimiento como las matemáticas, la

estadística y las ciencias de la computación, por ello existen diversas maneras de aprender e implementar esta disciplina [88].

El Machine Learning cuenta con un dominio muy amplio, por lo cual este se ha dividido en varios subcampos que se encargan de diferentes tipos de tareas de aprendizaje.

8.1.2.1. Aprendizaje supervisado

El aprendizaje es un término de gran relevancia para el Machine Learning. El aprendizaje implica una interacción entre el alumno y el entorno, debido a esto, se pueden dividir las tareas de aprendizaje de acuerdo con la naturaleza de esa interacción. La primera distinción para tener en cuenta es la diferencia entre el aprendizaje supervisado y el no supervisado [89].

En el aprendizaje supervisado se entrena al algoritmo a partir de datos en los cuales se ha especificado cuál es la respuesta correcta. Cuanto mayor es el conjunto de datos, el algoritmo puede aprender de mejor manera. Una vez realizado el proceso de entrenamiento, al sistema se le proporcionan nuevos datos sin estar etiquetados con la respuesta correcta, de esta forma, el algoritmo de aprendizaje hace uso de la experiencia pasada adquirida durante la etapa de entrenamiento para que con ella pueda predecir un resultado [88].

8.1.2.2. Aprendizaje no supervisado

En el aprendizaje no supervisado el algoritmo es entrenado con un conjunto de datos a los que no se ha especificado cual es la respuesta correcta. La idea principal es que el algoritmo pueda encontrar por si solo patrones que lo ayuden a entender el conjunto de datos que se le ha dado [88].

8.1.2.3. Aprendizaje por refuerzo

Para este tipo de aprendizaje, el algoritmo aprende observando el mundo que lo rodea. La información que le es proporcionada es la retroalimentación que obtiene del mundo exterior como consecuencia de sus acciones, por ello el sistema aprende a base de ensayo y error [88].

8.1.2.4. Sobreajuste

Un punto para tener en consideración es el sobreajuste, el cual, es la tendencia con la que cuenta la mayoría de los algoritmos de Machine Learning al ajustarse a características muy específicas que contienen los datos de entrenamiento y que a su vez no cuentan con una relación causal con la función objetivo que se busca. Para ello existen estrategias que permiten trabajar con el sobreajuste, la retención

de datos y la validación cruzada. En la retención de datos, la idea principal es dividir el conjunto de datos con el cual se trabaja, de esta manera todos los datos no son presentados al algoritmo en la etapa del entrenamiento, si no que existirá una retención de datos de tal manera que se pueda realizar una evaluación de la efectividad del modelo. Con esto se busca evitar que los mismos datos que se usan para entrenar, sean los mismos que se utilizan para evaluar. La validación cruzada consiste en realizar un análisis estadístico para obtener otras medidas del rendimiento estimado, como lo es la media y la varianza, esto con el fin de poder entender cómo se espera que el rendimiento varíe a través de los distintos conjuntos de datos. Además, hace un mejor uso de con conjunto de datos limitados. La validación cruzada, calcula sus estimaciones sobre todo el conjunto de datos con el que se trabaja mediante la realización de múltiples divisiones e intercambios sistemáticos entre los datos de entrenamiento y los de evaluación [88], [89].

8.1.2.5. Algoritmos usados en machine learning

Los algoritmos que frecuentemente son utilizados para aplicaciones de machine learning son los siguientes:

1. Máquinas de soporte vectorial (SVM)
2. KNN
3. K-means
4. Árboles de decisión
5. Random forest
6. Regresión lineal

Máquinas de soporte vectorial (SVM)

La idea principal de este algoritmo es encontrar un plano que sea capaz de separar los grupos de datos con los que se está trabajando de la mejor manera posible. La separación indica que la elección del plano maximiza el margen entre los puntos más cercanos en el plano, dichos puntos se denominan vectores de soporte [88].

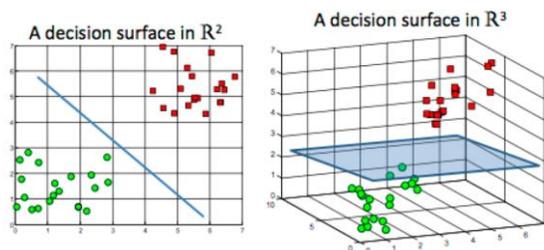


Figura 87. Ejemplo de plano que separa dos clases en R^2 y R^3 (SVM) [90]

KNN

Este método estima el valor de la probabilidad a posteriori de que un elemento x pertenezca a una clase en particular partiendo de la información proporcionada por el conjunto de prototipos. La regresión que se utiliza en KNN se pueda calcular simplemente con el promedio del punto k más cercano al punto que se está probando [88].

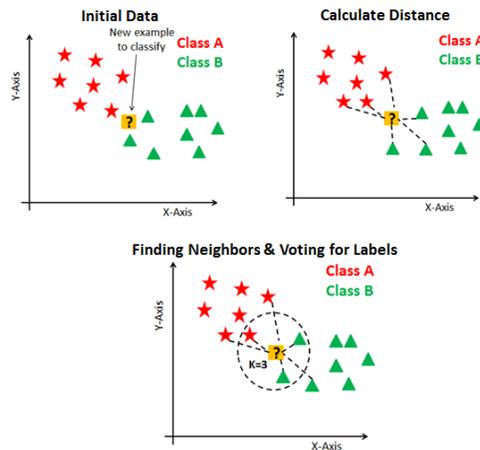


Figura 88. Pasos básicos en KNN; 1) Cálculo de distancia, 2) Se encuentran los k vecinos más cercanos, 3) Se vota por las clases [91]

K-means

Es un algoritmo de agrupamiento y de aprendizaje no supervisado. Es un algoritmo simple, su finalidad es reducir al mínimo la suma de las distancias cuadradas desde la media dentro del agrupamiento. Para realizar este procedimiento, es necesario establecer un número que previamente se especifica y se define como K , posteriormente se va asignando cada observación a la agrupación más cercana de acuerdo con su media [88].

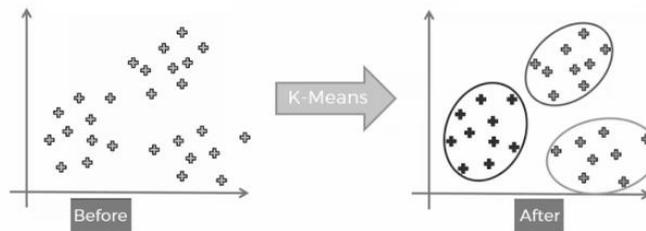


Figura 89. Agrupamiento de K-means [92]

Árboles de decisión

Son diagramas que cuentan con construcciones lógicas similares a los sistemas de predicción que se basan en reglas, estos sirven para representar y categorizar una serie de condiciones que ocurren de manera sucesiva, esto con el fin de resolver un problema. Los árboles de decisión se confirman por nodos interiores, nodos terminales y ramas que salen de los nodos interiores. Cada nodo interior del árbol contiene una prueba de un atributo, a su vez cada rama representa un valor distinto del atributo. Siguiendo las ramas desde el nodo raíz hacia abajo, cada ruta finalmente termina en un nodo que crea una segmentación de los datos [88].

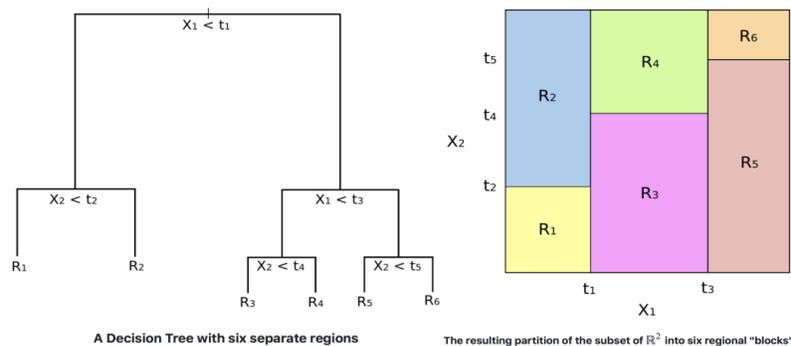


Figura 90. Árboles de decisión [93]

Random forest

La idea central de random forest es utilizar un gran conjunto de árboles de decisión muy poco profundos, posteriormente se toma la clase que cada árbol eligió. Estos árboles de decisión se crean mediante un algoritmo que introduce dos fuentes de aleatoriedad, esto con el fin de reducir la correlación que existe entre ellos y mejorar las predicciones que se pueden obtener. Una vez que se genera el random forest, la predicción se tomó al promediar las predicciones individuales de cada uno de los árboles de decisión [88], [94].

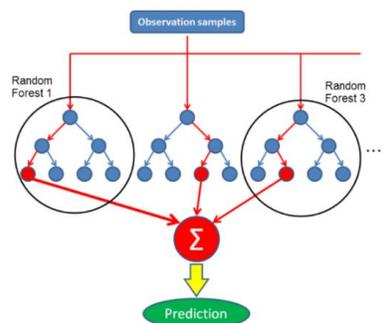


Figura 91. Representación de random forest [95]

Regresión lineal

Este método es utilizado para estimar los valores reales basándose en variables continuas. La idea principal es establecer la relación que existe entre las variables independientes y las variables dependientes por medio de ajuste a una línea recta [88].

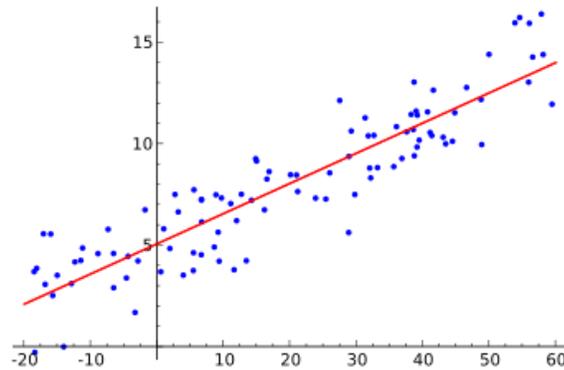


Figura 92. Representación de la regresión lineal [96]

8.1.3. Deep learning

El deep learning es un conjunto de algoritmos que trata de modelar problemas de alto nivel haciendo uso de arquitecturas compuestas por transformaciones no lineales múltiples. El deep learning es un tipo específico de machine learning [97].

Los modelos utilizados en deep learning involucran decenas e incluso cientos de capas sucesivas de representación, por lo cual, todos los parámetros que contienen son aprendidos de manera automática mediante la exposición de los datos de entrenamiento a estos modelos. El deep learning utiliza distintas estructuras de redes neuronales, esto con el fin de lograr que el aprendizaje sea cada vez más significativo [97].

Dentro del deep learning existen dos conceptos importantes, el backpropagation (propagación hacia atrás) y las redes neuronales artificiales.

8.1.3.1. Backpropagation

El backpropagation (propagación hacia atrás) es un algoritmo que funciona mediante la determinación del error en la salida y luego propagándolo de nuevo hacia atrás dentro de una red. De esta manera, los pesos del sistema se van modificando de manera que el error resultante se va minimizando en cada neurona. Este algoritmo es lo que permite que las redes neuronales que aprendan [97].

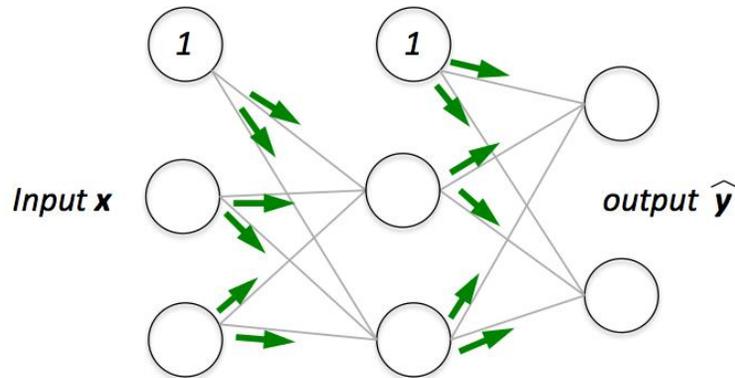


Figura 93. Representación de backpropagation [97]

8.1.3.2. Redes neuronales

Las redes neuronales son un modelo computacional que se basa en un gran conjunto de unidades neuronales simples, estos funcionan de manera similar a las neuronas de los cerebros biológicos.

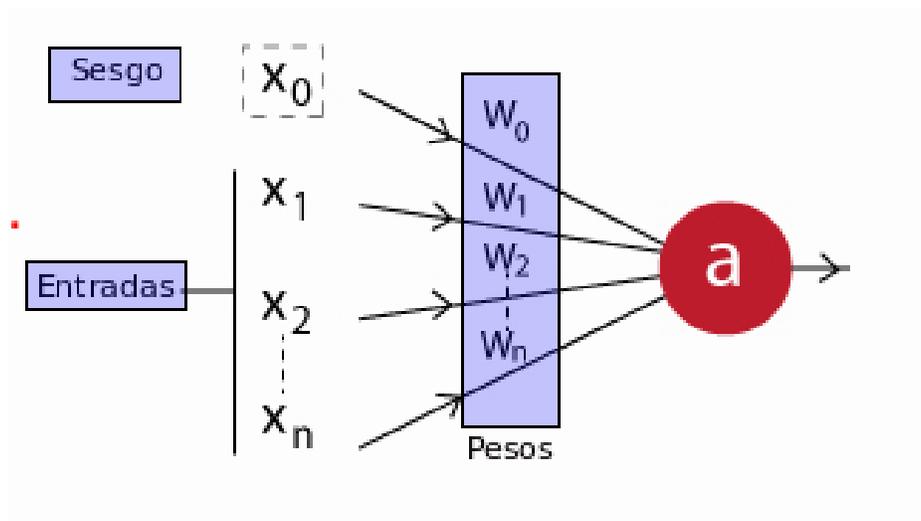


Figura 94. Representación de las neuronas simples [97]

Cada una de las neuronas está conectada con muchas otras, los enlaces entre estas pueden incrementar o inhibir el estado de activación de las neuronas adyacentes.

Dependiendo del tipo de datos con el que se trabaja o dependiendo de la tarea, existen diversas arquitecturas de redes neuronales que se adaptan mejor.

8.1.3.3. Redes neuronales prealimentadas

Estas fueron las primeras que se desarrollaron y su modelo es el más sencillo. En ellas la información se mueve solo hacia adelante. Los principales exponentes de este tipo de arquitectura con el perceptrón simple y el perceptrón multicapa. Estos suelen ser utilizados en problemas de clasificación simple [97].

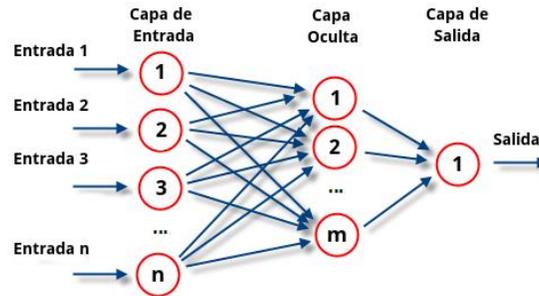


Figura 95. Representación de las redes neuronales prealimentadas [97]

8.1.3.4. Redes neuronales convolucionales

Este tipo de redes son muy similares a las redes neuronales convencionales. Están compuestas por neuronas que tienen pesos y sesgos que pueden aprender. Cada neurona recibe algunas entradas, realiza un producto escalar y posteriormente aplica una función de activación. Así como en el perceptrón multicapa también se cuenta con una función de pérdida sobre la última capa la cual será fully connected (totalmente conectada). La característica que diferencia a este tipo de redes neuronales es que su entrada son imágenes, esto permite codificar ciertas propiedades en la arquitectura permitiendo ganar en eficiencia y permite reducir el número de parámetros utilizados en la red. De forma general, las redes neuronales convolucionales están constituidas por una capa convolucional, una capa de reducción o de pooling y una capa de clasificación fully connected que nos dará el resultado de la red [97].

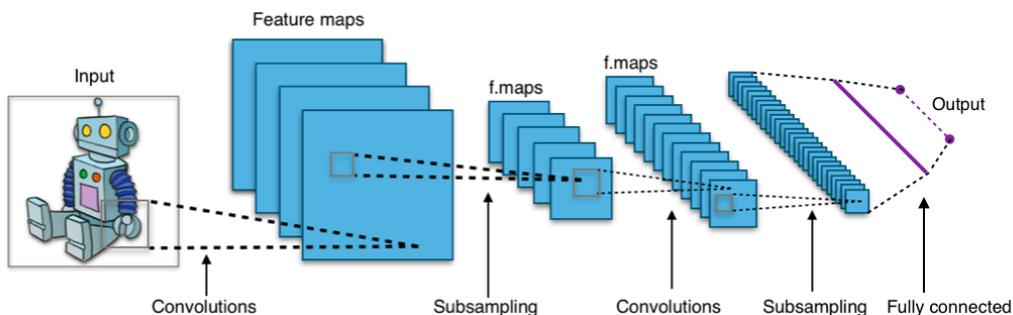


Figura 96. Representación de las redes neuronales convolucionales [97]

8.1.3.5. Redes neuronales recurrentes

Estas son redes con bucles de retroalimentación que permiten que la información persista. Estas pueden ser pensadas como una red que cuenta con múltiples copias de ella misma en donde cada una de ellas da un mensaje a las que siguen [97].

En general, el deep learning trata de mapear las entradas por medio de una red neuronal artificial que está compuesta por un número grande de capas que se encuentran distribuidas de forma jerárquica. La red aprende algo simple en la primera capa, posteriormente dicha información se envía a las capas siguientes en donde se va combinando de manera más compleja. El proceso continúa hasta construir algo más complejo a lo que se recibió en la primera capa, de esta manera la red ira aprendiendo mediante la exposición a los datos de ejemplo [97], [98].

8.1.3.6. Clasificador neuronal RTC

La idea básica del clasificador de umbrales aleatorios (Random Threshold Classifier, RTC) es hacer que el perceptrón multicapa tenga una conexión de entrenamiento de una sola capa, esto permite realizar un entrenamiento a alta velocidad [99], [100].

La estructura del clasificador RTC consta de S grupos similares, en donde cada grupo tiene una salida neuronal (b_1, \dots, b_s) . La entrada en cada grupo es proporcionada por un conjunto completo de características (X_1, \dots, X_n) . Cada característica X alimenta a dos neuronas, h_{ij} y l_{ij} , donde i ($i = 1, 2, \dots, n$) representa el número de característica y j ($j = 1, 2, \dots, s$) representa el número de grupo neuronal. El valor del umbral l_{ij} debe ser menor que el valor del umbral h_{ij} . La salida de la neurona l_{ij} está conectada a la entrada excitada la siguiente neurona a_{ij} , y la salida de la neurona h_{ij} está conectada a una salida inhibida de una neurona a_{ij} . La salida de la neurona a_{ij} ocurre sólo cuando la señal de una entrada excitada es igual a 1 y cuando la inhibida es igual a 0. Todas las salidas de neuronas a , en un grupo j , son conectadas a las entradas excitadas de una neurona b_j , que representa la salida de todo el grupo neuronal [99], [100].

La salida de cada bloque de neuronas está conectada con conexiones entrenables a todas las entradas de la capa de salida del clasificador (c_1, \dots, c_t) , donde t es un número de clases [99], [100].

El clasificador funciona de dos maneras, entrenamiento y reconocimiento. Para el entrenamiento se hace el uso de la regla de Hebb [99], [100].

La arquitectura del clasificador RTC se muestra en la (Figura 97).

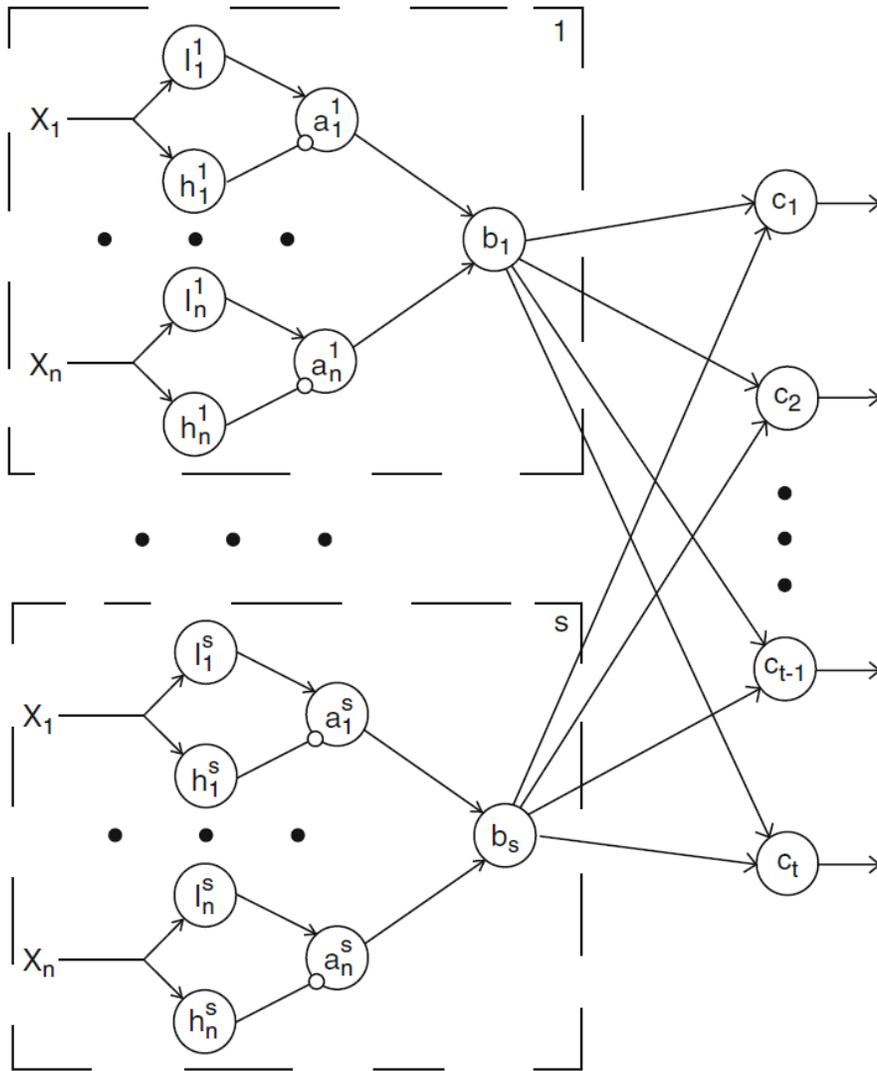


Figura 97. Estructura del clasificador RTC [99].

Código de MATLAB

```
clear;
clc;
I = imread('BASE.png');
I = rgb2gray(I);
[y,x] = find(I);
f1 = figure;
imshow(I)
hold on
plot(x,y,'.w');

p3 = [20 90]; p4 = [435 149]; p5 = [435 149]; p6 = [496 755]; p7 = [496 755];
p8 = [430 708]; p9 = [430 708]; p10 = [362 708];
p11 = [362 708]; p12 = [337 743]; p13 = [337 743]; p14 = [337 848]; p15 = [337
848]; p16 = [304 878]; p17 = [304 878]; p18 = [241 878];
p19 = [241 878]; p20 = [193 774]; p21 = [193 774]; p22 = [150 791]; p23 = [150
791]; p24 = [65 546]; p25 = [65 546]; p26 = [114 525];
p27 = [114 525]; p28 = [201 205]; p29 = [201 205]; p30 = [111 145]; p31 = [111
145]; p32 = [460 400]; p33 = [422 416]; p34 = [422 416];
p35 = [355 474]; p36 = [355 474]; p37 = [409 479]; p38 = [409 479]; p39 = [428
435]; p40 = [428 435]; p41 = [467 470]; p42 = [479 605];
p43 = [428 583]; p44 = [428 583]; p45 = [319 583]; p46 = [319 583]; p47 = [261
747]; p48 = [261 747]; p49 = [400 681]; p50 = [400 681];
p51 = [447 696]; p52 = [447 696]; p53 = [470 647]; p54 = [470 647]; p55 = [484
658]; p56 = [132 740]; p57 = [174 736]; p58 = [174 736];
p59 = [236 633]; p60 = [299 380]; p61 = [224 412]; p62 = [285 463]; p63 = [224
412]; p64 = [285 463]; p65 = [299 380]; p66 = [132 740];
p67 = [153 608]; p68 = [153 608]; p69 = [198 522]; p70 = [198 522]; p71 = [163
517]; p72 = [163 517]; p73 = [134 580]; p74 = [134 580];
p75 = [99 598]; p76 = [99 598]; p77 = [65 546];

plot([p3(2),p4(2)],[p3(1),p4(1)],'*g'); plot([p5(2),p6(2)],[p5(1),p6(1)],'*g');
plot([p6(2),p18(2)],[p6(1),p18(1)],'*g'); plot([p18(2),p24(2)],[p18(1),p24(1)],'*g');
plot([p24(2),p28(2)],[p24(1),p28(1)],'*g');

plot([p3(2),p4(2)],[p3(1),p4(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p5(2),p6(2)],[p5(1),p6(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p7(2),p8(2)],[p7(1),p8(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p9(2),p10(2)],[p9(1),p10(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p11(2),p12(2)],[p11(1),p12(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p13(2),p14(2)],[p13(1),p14(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p15(2),p16(2)],[p15(1),p16(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p17(2),p18(2)],[p17(1),p18(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p19(2),p20(2)],[p19(1),p20(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p21(2),p22(2)],[p21(1),p22(1)],'Color','b','LineWidth',2);
```

```

plot([p23(2),p24(2)],[p23(1),p24(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p25(2),p26(2)],[p25(1),p26(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p27(2),p28(2)],[p27(1),p28(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p29(2),p30(2)],[p29(1),p30(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p31(2),p3(2)],[p31(1),p3(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p32(2),p33(2)],[p32(1),p33(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p34(2),p35(2)],[p34(1),p35(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p36(2),p37(2)],[p36(1),p37(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p38(2),p39(2)],[p38(1),p39(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p40(2),p41(2)],[p40(1),p41(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p42(2),p43(2)],[p42(1),p43(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p44(2),p45(2)],[p44(1),p45(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p46(2),p47(2)],[p46(1),p47(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p48(2),p49(2)],[p48(1),p49(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p50(2),p51(2)],[p50(1),p51(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p52(2),p53(2)],[p52(1),p53(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p54(2),p55(2)],[p54(1),p55(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p56(2),p57(2)],[p56(1),p57(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p58(2),p59(2)],[p58(1),p59(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p60(2),p61(2)],[p60(1),p61(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p62(2),p63(2)],[p62(1),p63(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p64(2),p65(2)],[p64(1),p65(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p66(2),p67(2)],[p66(1),p67(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p68(2),p69(2)],[p68(1),p69(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p70(2),p71(2)],[p70(1),p71(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p72(2),p73(2)],[p72(1),p73(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p74(2),p75(2)],[p74(1),p75(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p76(2),p77(2)],[p76(1),p77(1)],'Color','b','LineWidth',2);

```

```

lmc = imread('FP.png');
lbw = im2bw(lmc);
lbw = imfill(lbw,'holes');
llabel = bwlabel(lbw);
stat = regionprops(llabel,'centroid');
for x = 1: numel(stat)
    plot(stat(x).Centroid(1),stat(x).Centroid(2),'ro');
end

```

```

lex = imread('EXP.png');
lbwex = im2bw(lex);
f2 = figure;
imshow(lex)
hold on
for x = 1: numel(stat)
    plot(stat(x).Centroid(1),stat(x).Centroid(2),'ro');
end

```

```

end
plot([p3(2),p4(2)],[p3(1),p4(1)],'*g'); plot([p5(2),p6(2)],[p5(1),p6(1)],'*g');
plot([p6(2),p18(2)],[p6(1),p18(1)],'*g'); plot([p18(2),p24(2)],[p18(1),p24(1)],'*g');
plot([p24(2),p28(2)],[p24(1),p28(1)],'*g');

f3 = figure;
imshow(lex)
hold on
for x = 1: numel(stat)
    plot(stat(x).Centroid(1),stat(x).Centroid(2),'ro');
end
plot([p3(2),p4(2)],[p3(1),p4(1)],'*g'); plot([p5(2),p6(2)],[p5(1),p6(1)],'*g');
plot([p6(2),p18(2)],[p6(1),p18(1)],'*g'); plot([p18(2),p24(2)],[p18(1),p24(1)],'*g');
plot([p24(2),p28(2)],[p24(1),p28(1)],'*g');

plot([p3(2),p4(2)],[p3(1),p4(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p5(2),p6(2)],[p5(1),p6(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p6(2),p18(2)],[p6(1),p18(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p18(2),p24(2)],[p18(1),p24(1)],'Color','b','LineWidth',2);
plot([p24(2),p28(2)],[p24(1),p28(1)],'Color','b','LineWidth',2);plot([p28(2),p3(2)],[p28
(1),p3(1)],'Color','b','LineWidth',2);
imwrite(lex,'F.png')

```

Código del microcontrolador Atmega328P

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>

Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();

const int chipSelect = 4;

#include "DHT.h"
#define DHTPIN 10
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

String str;
char cstr[25];

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Fallo en la tarjeta.");
    return;
  }
  dht.begin();
  mlx.begin();
}

void loop() {
  delay(15000);
  float h = dht.readHumidity();
  float t = dht.readTemperature();

  if (isnan(h) || isnan(t)) {
    Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
    return;
  }

  float H = (-0.4679 * h) + 40.348;
  float T = (0.7112 * t) + 7.5582;
  float TA = (0.7728 * mlx.readAmbientTempC()) + 7.917;
  float TO = (0.7728 * mlx.readObjectTempC()) + 7.917;
  int x = 0;

  String dataString = "";
```

```
dataString += String (H) + String(",") + String (T) + String(",") + String (TA) +  
String(",") + String (TO) + String(",") + String (x);
```

```
File dataFile = SD.open("DATA.txt", FILE_WRITE);  
if (dataFile) {  
  dataFile.println(dataString);  
  dataFile.close();  
}  
else {  
  Serial.println("Error abriendo DATA.txt");  
}  
  
Serial.print(dataString);  
  
delay(1000);  
}
```

Código del dispositivo de comunicación receptor

```
#include <SPI.h>  
#include <LoRa.h>  
#include <Wire.h>  
#include <Adafruit_GFX.h>  
#include <Adafruit_SSD1306.h>
```

```
#define SCK 5  
#define MISO 19  
#define MOSI 27  
#define SS 18  
#define RST 23  
#define DIO0 26
```

```
#define BAND 915E6
```

```
#define OLED_SDA 21  
#define OLED_SCL 22
```

```
#define SCREEN_WIDTH 128  
#define SCREEN_HEIGHT 64
```

```
int rssi;  
String loRaMessage;  
String TA;  
String TO;
```

```

String H;
String T;
String readingID;
int counter = 0;

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RST);

void startOLED() {
  pinMode(OLED_RST, OUTPUT);
  digitalWrite(OLED_RST, LOW);
  delay(20);
  digitalWrite(OLED_RST, HIGH);

  Wire.begin(OLED_SDA, OLED_SCL);
  if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3c, false, false)) {
    Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));
    for (;;)
  }
  display.clearDisplay();
  display.setTextColor(WHITE);
  display.setTextSize(1);
  display.setCursor(0, 0);
  display.print("LORA SENDER");
}

void startLoRA() {
  int counter;
  SPI.begin(SCK, MISO, MOSI, SS);
  LoRa.setPins(SS, RST, DIO0);
  while (!LoRa.begin(BAND) && counter < 10) {
    Serial.print(".");
    counter++;
    delay(500);
  }
  if (counter == 10) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
  }
  Serial.println("LoRa Initialization OK!");
  display.setCursor(0, 10);
  display.clearDisplay();
  display.print("LoRa Initializing OK!");
  display.display();
  delay(2000);
}

```

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  startOLED();
  startLoRA();
}

void loop() {
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {
    Serial.print("Lora packet received: ");

    while (LoRa.available()) {
      String LoRaData = LoRa.readString();
      Serial.print(LoRaData);
      int pos1 = LoRaData.indexOf('/');
      int pos2 = LoRaData.indexOf('&');
      int pos3 = LoRaData.indexOf('%');
      int pos4 = LoRaData.indexOf('$');

      readingID = LoRaData.substring(0, pos1);
      TA = LoRaData.substring(pos1 + 1, pos2);
      TO = LoRaData.substring(pos2 + 1, pos3);
      H = LoRaData.substring(pos3 + 1, pos4);
      T = LoRaData.substring(pos4 + 1, LoRaData.length());

      int rssi = LoRa.packetRssi();
      Serial.print(" with RSSI ");
      Serial.println(rssi);

      display.clearDisplay();
      display.setCursor(0, 0);
      display.setTextSize(1);
      display.setCursor(0, 0);
      display.print("  BASE CENTRAL");
      display.setCursor(72, 0);
      display.setCursor(0, 10);
      display.print("Hum.");
      display.setCursor(72, 10);
      display.print(H);
      display.setCursor(90, 10);
      display.print("%");
      display.setCursor(0, 20);
      display.print("Temp. 1");
      display.setCursor(72, 20);
      display.print(T);
    }
  }
}

```

```

display.setCursor(90, 20);
display.print("C");
display.setCursor(0, 30);
display.print("Temp. 2");
display.setCursor(72, 30);
display.print(TA);
display.setCursor(90, 30);
display.print("C");
display.setCursor(0, 40);
display.print("Temp. 3");
display.setCursor(72, 40);
display.print(TO);
display.setCursor(90, 40);
display.print("C");
display.setCursor(0, 50);
display.print("INTENSIDAD:");
display.setCursor(72, 50);
display.print(rssi);
display.display();
}
}
}

```

Código del dispositivo de comunicación emisor

```

#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <Separador.h>

#define SCK 5
#define MISO 19
#define MOSI 27
#define SS 18
#define RST 23
#define DIO0 26

#define BAND 915E6

#define OLED_SDA 21
#define OLED_SCL 22

```

```
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
```

```
int readingID = 0;
int counter = 0;
String LoRaMessage = "";
Separador s;
```

```
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RST);
```

```
void startOLED() {
  pinMode(OLED_RST, OUTPUT);
  digitalWrite(OLED_RST, LOW);
  delay(20);
  digitalWrite(OLED_RST, HIGH);

  Wire.begin(OLED_SDA, OLED_SCL);
  if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3c, false, false)) {
    Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));
    for (;;)
  }
  display.clearDisplay();
  display.setTextColor(WHITE);
  display.setTextSize(1);
  display.setCursor(0, 0);
  display.print("LORA SENDER");
}
```

```
void startLoRA() {
  SPI.begin(SCK, MISO, MOSI, SS);
  LoRa.setPins(SS, RST, DIO0);

  while (!LoRa.begin(BAND) && counter < 10) {
    counter++;
    delay(500);
  }
  if (counter == 10) {
    readingID++;
  }
  display.setCursor(0, 10);
  display.clearDisplay();
  display.print("LoRa Initializing OK!");
}
```

```

display.display();
delay(2000);
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  startOLED();
  startLoRA();
}
void loop() {
  if (Serial.available()) {
    serialEvent();
  }
}

void serialEvent() {
  String datosrecibidos = Serial.readString();

  String E1 = s.separa(datosrecibidos, ',', 0);
  String E2 = s.separa(datosrecibidos, ',', 1);
  String E3 = s.separa(datosrecibidos, ',', 2);
  String E4 = s.separa(datosrecibidos, ',', 3);
  String E5 = s.separa(datosrecibidos, ',', 4);

  float H = E1.toFloat();
  float T = E2.toFloat();
  float TA = E3.toFloat();
  float TO = E4.toFloat();

  LoRaMessage = String(readingID) + "/" + String(TA) + "&" + String(TO) + "%" +
String(H) + "$" + String(T);

  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print(LoRaMessage);
  LoRa.endPacket();

  display.clearDisplay();
  display.setCursor(0, 0);
  display.setTextSize(1);
  display.setCursor(0, 0);
  display.print("Hum.");
  display.setCursor(72, 0);
  display.print(H);
  display.setCursor(0, 10);
  display.print("Temp. 1");

```

```
display.setCursor(72, 10);
display.print(T);
display.setCursor(0, 20);
display.print("Temp. 2");
display.setCursor(72, 20);
display.print(TA);
display.setCursor(0, 30);
display.print("Temp. 3");
display.setCursor(72, 30);
display.print(TO);
display.setCursor(0, 50);
display.print("Dato #");
display.setCursor(72, 50);
display.print(readingID);

display.display();
readingID++;
}
```

Atmega328P datasheet

Features

- High Performance, Low Power AVR[®] 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 131 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 20 MIPS Throughput at 20 MHz
 - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
 - 4/8/16/32K Bytes of In-System Self-Programmable Flash program memory (ATmega48PA/88PA/168PA/328P)
 - 256/512/512/1K Bytes EEPROM (ATmega48PA/88PA/168PA/328P)
 - 512/1K/1K/2K Bytes Internal SRAM (ATmega48PA/88PA/168PA/328P)
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C⁽¹⁾
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
In-System Programming by On-chip Boot Program
True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
 - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Six PWM Channels
 - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
Temperature Measurement
 - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
Temperature Measurement
 - Programmable Serial USART
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Byte-oriented 2-wire Serial Interface (Philips I²C compatible)
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
 - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 23 Programmable I/O Lines
 - 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF
- Operating Voltage:
 - 1.8 - 5.5V for ATmega48PA/88PA/168PA/328P
- Temperature Range:
 - -40°C to 85°C
- Speed Grade:
 - 0 - 20 MHz @ 1.8 - 5.5V
- Low Power Consumption at 1 MHz, 1.8V, 25°C for ATmega48PA/88PA/168PA/328P:
 - Active Mode: 0.2 mA
 - Power-down Mode: 0.1 µA
 - Power-save Mode: 0.75 µA (Including 32 kHz RTC)



8-bit **AVR[®]**
Microcontroller
with 4/8/16/32K
Bytes In-System
Programmable
Flash

ATmega48PA
ATmega88PA
ATmega168PA
ATmega328P

Summary

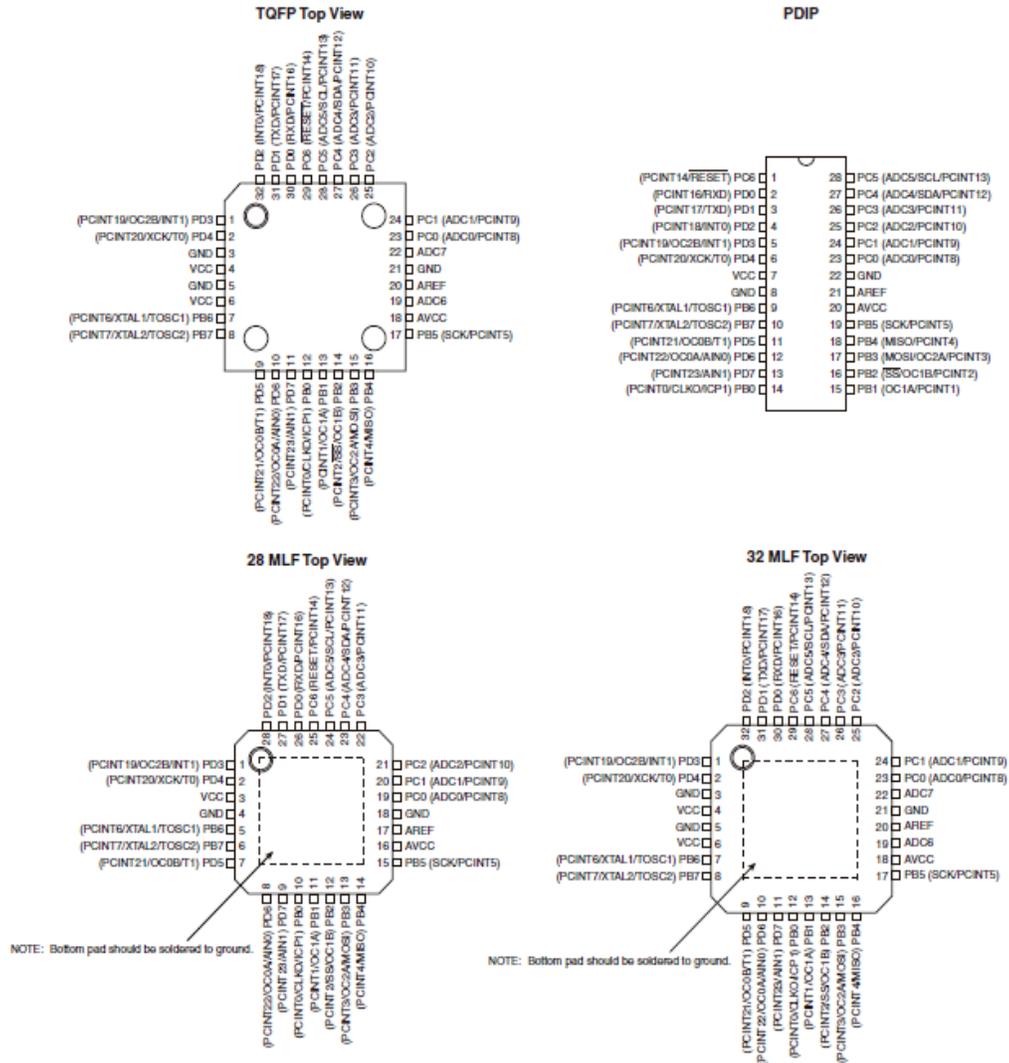
Rev. 8161DS-AVR-10/09



ATmega48PA/88PA/168PA/328P

1. Pin Configurations

Figure 1-1. Pinout ATmega48PA/88PA/168PA/328P



Espacio FIFO: 64 bytes
Tasa de datos: 1,2 K ~ 300Kbps @ FSK
0.018K ~ 37,5 Kbps @ LoRa
Modo de modulación: FSK,GFSK MSK... el sistema GMSK LoRa TM OOK
Interfaz forma: SPI
Corriente de sueño: 0.2uA @ Sleep
1.5uA @ IDLE
Temperatura de funcionamiento:-40 °C- + 85 °C
Digital RSSI función
De Frecuencia automático de corrección
Control automático de ganancia
Sensor de temperatura y detección de bajo voltaje
Activación rápida y salto de frecuencia
Controlador de paquetes de datos altamente configurable

GPS

Módulos GPS NEO-6M, fuente de alimentación Universal de 3V-5V
Módulo con antena de cerámica, super señal
Guardar los datos de parámetros de configuración EEPROM Down
Con los datos de copia de seguridad de la batería
Hay indicador de señal LED
Tasa de baudios predeterminada: 9600

Poder

TP5400
1A de gestión de batería
Indicador LED: hay 4 ledes que muestran el estado de la batería en tiempo real.
USB
CP2104-GMR
Pre-Flash del Firmware
-SoftRF V4.0

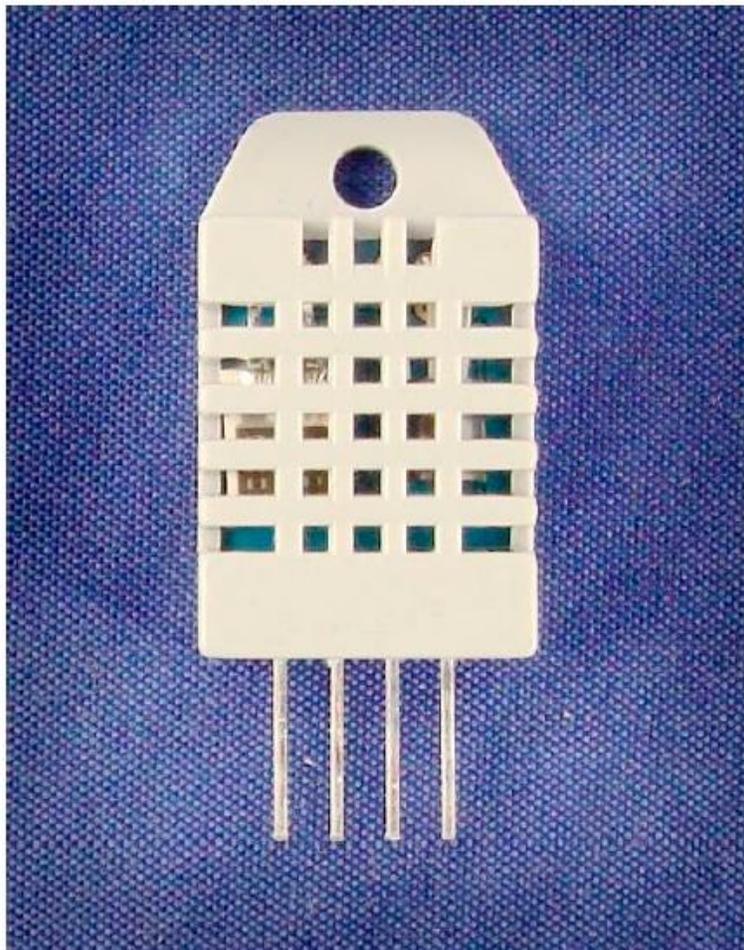
DHT22 datasheet

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors

Digital-output relative humidity & temperature sensor/module

DHT22 (DHT22 also named as AM2302)



Capacitive-type humidity and temperature module/sensor

1

Thomas Liu (Business Manager)

Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn

Aosong Electronics Co.,Ltd

Your specialist in innovating humidity & temperature sensors

1. Feature & Application:

- * Full range temperature compensated * Relative humidity and temperature measurement
- * Calibrated digital signal * Outstanding long-term stability * Extra components not needed
- * Long transmission distance * Low power consumption * 4 pins packaged and fully interchangeable

2. Description:

DHT22 output calibrated digital signal. It utilizes exclusive digital-signal-collecting-technique and humidity sensing technology, assuring its reliability and stability. Its sensing elements is connected with 8-bit single-chip computer.

Every sensor of this model is temperature compensated and calibrated in accurate calibration chamber and the calibration-coefficient is saved in type of programme in OTP memory, when the sensor is detecting, it will cite coefficient from memory.

Small size & low consumption & long transmission distance(20m) enable DHT22 to be suited in all kinds of harsh application occasions.

Single-row packaged with four pins, making the connection very convenient.

3. Technical Specification:

Model	DHT22	
Power supply	3.3-6V DC	
Output signal	digital signal via single-bus	
Sensing element	Polymer capacitor	
Operating range	humidity 0-100%RH;	temperature -40~80Celsius
Accuracy	humidity +2%RH(Max +5%RH); temperature <+0.5Celsius	
Resolution or sensitivity	humidity 0.1%RH;	temperature 0.1Celsius
Repeatability	humidity +1%RH;	temperature +0.2Celsius
Humidity hysteresis	+0.3%RH	
Long-term Stability	+0.5%RH/year	
Sensing period	Average: 2s	
Interchangeability	fully interchangeable	
Dimensions	small size 14*18*5.5mm;	big size 22*28*5mm

4. Dimensions: (unit---mm)

1) Small size dimensions: (unit---mm)

2

Thomas Liu (Business Manager)

Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn

MLX90614 datasheet



MLX90614 family Single and Dual Zone Infra Red Thermometer in TO-39

Features and Benefits

- ❑ Small size, low cost
- ❑ Easy to integrate
- ❑ Factory calibrated in wide temperature range:
 - 40 to 125 °C for sensor temperature and
 - 70 to 380 °C for object temperature.
- ❑ High accuracy of 0.5°C over wide temperature range (0..+50°C for both Ta and To)
- ❑ High (medical) accuracy calibration optional
- ❑ Measurement resolution of 0.02°C
- ❑ Single and dual zone versions
- ❑ SMBus compatible digital interface
- ❑ Customizable PWM output for continuous reading
- ❑ Available in 3V and 5V versions
- ❑ Simple adaptation for 8 to 16V applications
- ❑ Power saving mode
- ❑ Different package options for applications and measurements versatility
- ❑ Automotive grade

Applications Examples

- ❑ High precision non-contact temperature measurements;
- ❑ Thermal Comfort sensor for Mobile Air Conditioning control system;
- ❑ Temperature sensing element for residential, commercial and industrial building air conditioning;
- ❑ Windshield defogging;
- ❑ Automotive blind angle detection;
- ❑ Industrial temperature control of moving parts;
- ❑ Temperature control in printers and copiers;
- ❑ Home appliances with temperature control;
- ❑ Healthcare;
- ❑ Livestock monitoring;
- ❑ Movement detection;
- ❑ Multiple zone temperature control – up to 100 sensors can be read via common 2 wires
- ❑ Thermal relay/alert
- ❑ Body temperature measurement

Ordering Information



Part No. MLX90614 $\begin{matrix} X \\ (1) \end{matrix}$ $\begin{matrix} X \\ (2) \end{matrix}$ $\begin{matrix} X \\ (3) \end{matrix}$

(1) Supply Voltage:
A - 5V power
(adaptable for 12V)
B - 3V power

(2) Number of thermopiles:
A – single zone
B – dual zone

(3) Package type:
A – Filter inside
B – Filter outside

1 Functional diagram

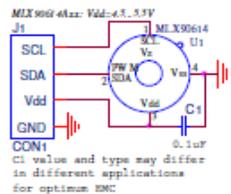


Figure 1 Typical application schematics

2 General Description

The MLX90614 is an Infra Red thermometer for non contact temperature measurements. Both the IR sensitive thermopile detector chip and the signal conditioning ASSP are integrated in the same TO-39 can.

Thanks to its low noise amplifier, 17-bit ADC and powerful DSP unit, a high accuracy and resolution of the thermometer is achieved.

The thermometer comes factory calibrated with a digital PWM and SMBus output.

As a standard, the 10-bit PWM is configured to continuously transmit the measured temperature in range of -20 to 120 °C, with an output resolution of 0.14 °C.

The POR default is SMBus interface



MLX90614 family

*Single and Dual Zone
Infra Red Thermometer in TO-39*

General description (continued)

The MLX90614 is built from 2 chips developed and manufactured by Melexis:
The Infra Red thermopile detector MLX81101.
The signal conditioning ASSP MLX90302, specially designed to process the output of IR sensor.
The device is available in an industry standard TO-39 package.

Thanks to the low noise amplifier, high resolution 17-bit ADC and powerful DSP unit of MLX90302 high accuracy and resolution of the thermometer is achieved. The calculated object and ambient temperatures are available in RAM of MLX90302 with resolution of 0.01 °C. They are accessible by 2 wire serial SMBus compatible protocol (0.02°C resolution) or via 10-bit PWM (Pulse Width Modulated) output of the device.

The MLX90614 is factory calibrated in wide temperature ranges: -40 to 125 °C for the ambient temperature and -70 to 382.2 °C for the object temperature. The 10-bit PWM is as a standard configured to transmit continuously the measured object temperature for an object temperature range of -20 to 120 °C with an output resolution of 0.14 °C. The PWM can be easily customized for virtually any range desired by customer by changing the content of 2 EEPROM cells. This has no effect on the factory calibration of the device.

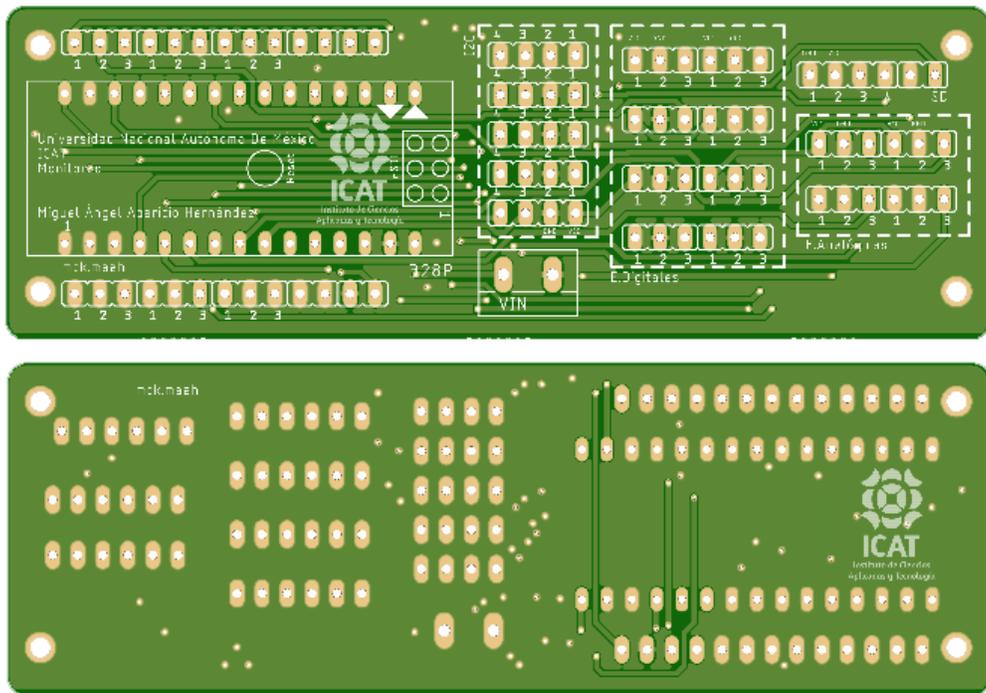
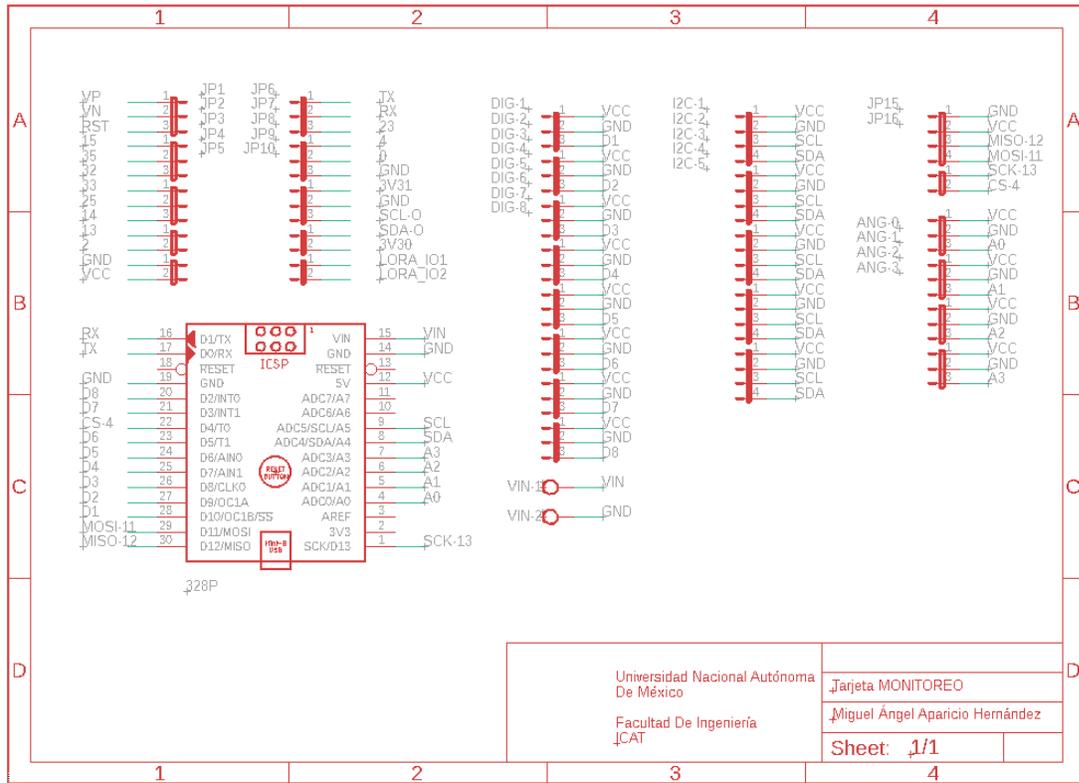
The PWM pin can also be configured to act as a thermal relay (input is T_o), thus allowing for an easy and cost effective implementation in thermostats or temperature (freezing/boiling) alert applications. The temperature threshold is user programmable. In an SMBus system this feature can act as a processor interrupt that can trigger reading all slaves on the bus and to determine the precise condition.

As a standard, the MLX90614 is calibrated for an object emissivity of 1. It can be easily customized by the customer for any other emissivity in the range 0.1-1.0 without the need of recalibration with a black body.

The thermometer is available in 2 supply voltage options: 5V compatible or 3V (battery) compatible. The 5V can be easily adopted to operate from a higher supply voltage (8-16V, for example) by use of few external components (refer to "Applications information" section for details).

An optical filter (long-wave pass) that cuts off the visible and near infra-red radiant flux is integrated in the package to provide sunlight immunity.

Diagrama y modelo del PCB diseñado



REFERENCIAS

- [1] La importancia de los bosques para el planeta; [En línea]. Disponible en: <http://www.fonabosque.gob.bo/la-importancia-de-los-bosques-para-el-planeta/>
- [2] Erazo P. Jennyfer K., Hervas P. Carlos A., Sistema de detección de incendios forestales mediante redes sensoriales inalámbricas (Zigbee), Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, 2014.
- [3] Centro Nacional de Prevención de Desastres, Incendios forestales: evítalos, México, Ciudad de México 2019.
- [4] Comisión Nacional Forestal, Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores, Zapopan, Jal., México, 2010.
- [5] Sistemas automáticos como ayuda en la detección temprana de incendios forestales; [En línea]. Disponible en: http://7cfe.congresoforestal.es/sites/default/files/sesion/adj/taller23_enrique_delacruz.pdf
- [6] Hernández Hostaller Néstor, Evaluación de tecnologías de sensores para la detección temprana de incendios forestales, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica., Ecuador, 2016.
- [7] Erazo P. Jennyfer K., Hervas P. Carlos A., Sistema de detección de incendios forestales mediante redes sensoriales inalámbricas (Zigbee), Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, 2014.
- [8] Liu, Y., Gu, Y., Chen, G., Ji, Y., Li, J.: A novel accurate forest fire detection system using wireless sensor networks. In: Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), Seventh International Conference, Beijing, China, 2011.
- [9] Pesantez, D. F. A. (2015). Evaluación de una red de sensores inalámbrica para detección de incendios forestales. Revista Tecnológica-ESPOL, 28(3).

-
- [10] Quintanilla Lahiguera, R. (2019). Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores para la detección precoz de incendios forestales (Doctoral dissertation).
- [11] Solis López, C. K., & Vicuña Gaibor, M. B. (2017). Redes inalámbricas de sensores para detección temprana de incendios forestales (Bachelor's thesis, Quevedo: UTEQ).
- [12] Gay, J. A., Lobón, I., & Cuññas, I. (2011). Redes inalámbricas de sensores para el seguimiento del estado de la vegetación y la detección temprana de incendios forestales. *Spanish Journal of Rural Development*, 2(5).
- [13] Mero Merchán, K. J., & Hermenejildo Reyes, J. A. (2019). Diseño de un sistema de detección temprana de incendios forestales utilizando redes de sensores inalámbricos (WSN), implementados con hardware y software libre (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Carrera de Ingeniería en Networking y Telecomunicaciones).
- [14] Álvarez Laperal, J. (2018). Desarrollo e implementación de una red inalámbrica de bajo consumo para la prevención y detección de incendios (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [15] GUEVARA ORTIZ, E. N. R. I. Q. U. E., QUAAS WEPPEN, R. O. B. E. R. T. O., & FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, G. E. O. R. G. I. N. A. (2006). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y municipales de peligros y riesgos.
- [16] Sistemas de alerta temprana, Centro nacional de prevención de desastres; [En línea]. Disponible en:
http://www.cenapred.gob.mx/es/documentosWeb/Enaproc/curso_Alerta_Temprana.pdf
- [17] Ocharan, J. (2007). Sistemas de Alerta Temprana. Fotografía actual y retos. Cuadernos Internacionales de Tecnología para el Desarrollo Humano, 2007, núm. 6.

[18] MANUAL; 10 Preguntas, 10 Respuestas Sobre: Sistemas de Alerta Temprana; [En línea]. Disponible en:

<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/San-Jose/pdf/Panama%20MANUAL%20INFORMATIVO.pdf>

[19] CENAPRED (2001) Diagnóstico de peligro e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana, pp. 225.

[20] Dentoni, M.; Muñoz, M. (2012). Evaluación de peligro de incendios. Informes técnicos. Informe técnico No. 1. Programa Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios y Alerta Temprana. Argentina. ISSN 2313-9420, mayo, pp. 36.

[21] SEMARNAT; [En línea]. Disponible en: <http://www.gob.mx/semarnat>

[22] Detección y Monitoreo de Focos de Calor Relacionados a Incendios Forestales en Tiempo Real Usando Hazard Mapping System del SMN; [En línea]. Disponible en:

<http://www.proyectomesoamerica.org:8088/emsa/documentos/Proyectos/IF/Presentaciones/Monitoreo%20focos%20de%20calor%20SMN-MX.pdf>

[23] Mas, J. F. (2011). Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio.

[24] Vera Mella, N. (2005). Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la península Ibérica. Universitat Politècnica de Catalunya.

[25] Echevarría, L. I., & Panduro, L. P. (1991). Satélites meteorológicos. Cuadernos de estrategia, (28), 117-143.

[26] Sistema de alerta temprana de incendios forestales CONABIO; [En línea]. Disponible en:

http://www.proyectomesoamerica.org:8088/emsa/documentos/Proyectos/IF/Presentaciones/SistemaAlertaTemprana_CONABIO.pdf

-
- [27] SEREPSA. (2008) Manual de Procedimientos. Programa de Adopción de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Secretaría Ejecutiva REPSA, Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México.
- [28] Lot, A., Pérez Escobedo, M., Gil Alarcón, G., Rodríguez Palacios, S., & Camarena, P. (2012). La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de riesgos. 30 aniversario 1983-2013.
- [29] Guillermo, M. G., Delia, B. G. A., Ariel, R. C. J., & José, G. G. (2008). Uso de estaciones meteorológicas en la agricultura.
- [30] Estaciones Meteorológicas; [En línea]. Disponible en:
https://s.campbellsci.com/documents/es/product-brochures/b_weatherstation.pdf
- [31] Elizondo, F. U. (2011). Utilización de estaciones meteorológicas automáticas como nueva alternativa para el registro y transmisión de datos. *Posgrado y Sociedad. Revista Electrónica del Sistema de Estudios de Posgrado*, 11(1), 33-49.
- [32] Tipos de estaciones meteorológicas; [En línea]. Disponible en:
<http://www.guiaspracticass.com/estaciones-meteorologicas/tipos-de-estaciones-meteorologicas>
- [33] Estación meteorológica con anemómetro TFA 35.1140; [En línea]. Disponible en: <https://www.casaclima.com/Estaci%C3%B3n-meteorol%C3%B3gica-con-anem%C3%B3metro-TFA-35.1140-a351140.html>
- [34] Analogue Outdoor Weather Station Made of Stainless Steel; [En línea]. Disponible en: <https://www.tfa-dostmann.de/en/produkt/analogue-outdoor-weather-station-made-of-stainless-steel-6/>
- [35] Estación meteorológica portátil; [En línea]. Disponible en:
<http://www.guiaspracticass.com/estaciones-meteorologicas/estacion-meteorologica-portatil>
- [36] Estación meteorológica doméstica excelvan; [En línea]. Disponible en:
<https://jardineria.top/mejores-estaciones-meteorologicas-domesticas/>

[37] MetPak RG Estación pluviométrica/meteorológica; [En línea]. Disponible en: <http://sensovant.com/productos/meteorologia/pluviometria-hielo/articulo/estacion-pluviometrica-MetPak-RG.html>

[38] Arias, M. F., Medina, J. A. C., Castillo, R. G. M., & Torres, M. D. S. (2011). Elaboración de un objeto de aprendizaje basado en datos meteorológicos del PEMBU de la ENP, UNAM. *Revista Geográfica de América Central*, 2(47E).

[39] Eguiarte, A. F., Centeno, R. R., & Hidalgo, J. Z. *Redes de Observación Atmosférica y Ambiental*.

[40] Atlas Climático Digital de México Redes de observación atmosférica y ambiental; [En línea]. Disponible en:

<https://atlasclimatico.unam.mx/RUOA/servmapas>

[41] García Espinosa Manuel, Villers Ruiz L., Gutiérrez López W., Robles Roldán M. A., *Desarrollo de una red de estaciones meteorológicas para evaluar riesgos por incendios en áreas forestales, caso parque nacional “la malinche”, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., MEXICO, 2013.*

[42] Descripción general de las técnicas de lógica difusa; [En línea]. Disponible en:

<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6887/04Rpp04de11.pdf>

[43] *Lógica Difusa una introducción práctica, técnicas de Soft computing*; [En línea]. Disponible en:

https://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf

[44] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.

[45] Ramírez Ramos Osvaldo, *Simulación en simmechanics de un sistema de control difuso para el robot UDLAP*, Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, México, 2008.

[46] Pérez Pueyo, R. (2005). *Procesado y optimización de espectros Raman mediante técnicas de lógica difusa: aplicación a la identificación de materiales pictóricos*. Universitat Politècnica de Catalunya.

-
- [47] Diciembre Sanahuja, S. (2017). Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK).
- [48] Sistemas expertos y lógica difusa; [En línea]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/maza_c_ac/capitulo2.pdf
- [49] Bolourchi, P., & Uysal, S. (2013, June). Forest fire detection in wireless sensor network using fuzzy logic. In 2013 Fifth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (pp. 83-87). IEEE.
- [50] Khanna, V., & Cheema, R. K. (2013). Fire detection mechanism using fuzzy logic. International Journal of Computer Applications, 65(12).
- [51] Dutta, M., Bhowmik, S., & Giri, C. (2014). Fuzzy logic-based implementation for forest fire detection using wireless sensor network. In Advanced Computing, Networking and Informatics-Volume 1 (pp. 319-327). Springer, Cham.
- [52] Toledo-Castro, J., Caballero-Gil, P., Rodríguez-Pérez, N., Santos-González, I., Hernández-Goya, C., & Aguasca-Colomo, R. (2018). Forest fire prevention, detection, and fighting based on fuzzy logic and wireless sensor networks. Complexity, 2018.
- [53] Garcia-Jimenez, S., Jurio, A., Pagola, M., De Miguel, L., Barrenechea, E., & Bustince, H. (2017). Forest fire detection: A fuzzy system approach based on overlap indices. Applied Soft Computing, 52, 834-842.
- [54] Cervantes, M., Montiel Villegas, L., Lot, A., & Rodríguez Cruz, G. (2008). Manual de procedimientos del Programa de Adopción de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (ProREPSA).
- [55] Mendoza, G. M. El Problema de la Galería de Arte. Polígonos, 5(12), 2.
- [56] Google Maps; [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com/maps>
- [57] Liu, T. (2013). Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302). Aosong Electronics; [En línea]. Disponible en: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>

-
- [58] Sensor DHT22; [En línea]. Disponible en: <https://arduitronicsshopmx.com/wp-content/uploads/2020/03/dht22-1024x749.jpg>
- [59] Jin, G., Zhang, X., Fan, W., Liu, Y., & He, P. (2015). Design of non-contact infra-red thermometer based on the sensor of MLX90614. The Open Automation and Control Systems Journal.
- [60] Sensor de temperatura y humedad MLX90614; [En línea]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/330-sensor-de-temperatura-mlx90614.html>
- [61] Módulo tarjeta MicroSD; [En línea]. Disponible en: https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1QYC_mvXNtKJy0Fjq6x6yVXab.jpg
- [62] Redes inalámbricas. Techpedia.; [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/81581109.pdf>
- [63] Haciendo IoT con LoRa: Capítulo 1.- ¿Qué es LoRa y LoRaWAN?; [En línea]. Disponible en: <https://medium.com/beelan/haciendo-iot-con-lora-cap%C3%ADtulo-1-qu%C3%A9-es-lora-y-lorawan-8c08d44208e8>
- [64] LoRa, R. (2015). Alliance Technical Marketing Workgroup, “LoRaWANTM What is it. A technical overview of LoRa R and LoRaWAN TM,” LoRa R Alliance, San Ramon, CA, White Paper.
- [65] LILYGO TTGO T-Beam V1.0; [En línea]. Disponible en: <http://www.lilygo.cn/Private/ProductImg/Other//20190925104501812%E2%88%AEH242%E4%B8%BB%E5%9B%BE-1.jpg>
- [66] Deegan, P. (2005). Developing for the Atmel AVR microcontroller on Linux. Linux Journal, 2005(130), 10.
- [67] Pinout ATMEGA 328; [En línea]. Disponible en: <https://sandorobotics.com/wp-content/uploads/2019/02/328p-pinout.jpg>
- [68] Baterías de iones de litio, ventajas; [En línea]. Disponible en: <http://www.queyma.com/blog/baterias-de-iones-de-litio-ventajas/>

-
- [69] Ventajas y desventajas de las baterías de Litio-ion (Li-Ion); [En línea].
Disponible en: <https://www.bateriadelitiorecargable.com/es/content/8-ventajas-y-desventajas-de-baterias-de-litio>
- [70] Batería 18650; [En línea]. Disponible en: <https://portableengineering.com/wp-content/uploads/2015/12/186503.png>
- [71] TC4056A; [En línea]. Disponible en: <https://cdn.datasheetspdf.com/pdf-down/T/C/4/TC4056A-FUMANELECTRONICS.pdf>
- [72] Módulo cargador de baterías; [En línea]. Disponible en:
<https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1MNa6aPDuK1Rjy1zjq6zraFXas.jpg>
- [73] Módulo TP4056 Cargador De Batería; [En línea]. Disponible en:
<https://saber.patagoniatec.com/2019/09/modulo-tp4056-cargador-de-bateria/>
- [74] Buitrón Proaño, R. D., & Burbano Gube, G. V. (2010). Elaboración de una normativa para el diseño y diagnóstico de sistemas fotovoltaicos residenciales autónomos para el Ecuador (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2010).
- [75] LA CÉLULA SOLAR; [En línea]. Disponible en:
http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_04.htm
- [76] Voltaje, corriente y funcionamiento de paneles solares fotovoltaicos; [En línea]. Disponible en: <https://www.electricaplicada.com/voltaje-corriente-funcionamiento-sistemas-solares/>
- [77] Celda solar; [En línea]. Disponible en:
<http://proveedoracano.com/eshop/image/cache/catalog/Productos/Energia/celdasolar12w-760x1000.jpg>
- [78] MT3608; [En línea]. Disponible en:
<https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-PWR-3608/resources/MT3608.pdf>
- [79] Módulo elevador de voltaje; [En línea]. Disponible en:
http://proveedoracano.com/eshop/image/cache/catalog/Productos/Energia/MT3608_2-760x1000.jpg

[80] Datasheet SSD1306; [En línea]. Disponible en:

<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>

[81] Koestoer, R. A., Pancasaputra, N., Roihan, I., & Harinaldi. (2019, January). A simple calibration method of relative humidity sensor DHT22 for tropical climates based on Arduino data acquisition system. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2062, No. 1, p. 020009). AIP Publishing LLC.

[82] Métodos de: Medición, Prueba y Calibración; [En línea]. Disponible en:

<http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-05-07-metodos-de-medicion.pdf>

[83] Naseer, S., Aljunid, S. A., Ahmad, R. B., Abid, Y., Kamaruddin, R., & Salim, M. S. (2011). Wireless Sensor Actor Network based on fuzzy inference system for greenhouse climate control. Journal of Applied Sciences, 11(17), 3104-3116.

[84] Plan Estatal Contra Incendios 2012; [En línea]. Disponible en:

https://issuu.com/uliseszl64/docs/portada_plan_estatal_contra_incendios_2012_pc/19

[85] Edding, C. Z. Prevención y combate de incendios forestales. Manual de procedimientos del Programa de Adopción de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, 23.

[86] Introducción a la Inteligencia Artificial; [En línea]. Disponible en:

<https://iaarbook.github.io/inteligencia-artificial/>

[87] Inteligencia Artificial, Aprendizaje Automático y Aprendizaje Profundo; [En línea]. Disponible en: <https://planetachatbot.com/inteligencia-artificial-aprendizaje-autom%C3%A1tico-y-aprendizaje-profundo-862ca9790bb9>

[88] Introducción al Machine Learning; [En línea]. Disponible en:

<https://iaarbook.github.io/ML/>

[89] Shalev-Shwartz Shai, Ben-David Shai, Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms, Cambridge University Press, 1ra edición, 2014.

[90] Máquinas de Soporte Vectorial; [En línea]. Disponible en:

<https://ccc.inaoep.mx/~emorales/Cursos/NvoAprend/Acetatos/svm2017.pdf>

-
- [91] KNN visualization in just 13 lines of code; [En línea]. Disponible en: <https://towardsdatascience.com/knn-visualization-in-just-13-lines-of-code-32820d72c6b6>
- [92] Basic concepts of K-means Clustering; [En línea]. Disponible en: <https://kraj3.com.np/blog/2019/07/basic-concepts-of-k-means-clustering/>
- [93] Árboles de Decisión - Parte I; [En línea]. Disponible en: <https://bookdown.org/content/2031/arboles-de-decision-parte-i.html>
- [94] Pita González-Campos Víctor, Modelado mediante random forest de las emisiones de autobuses urbanos en función de los ciclos cinemáticos, Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [95] Random Forest – Árboles de Decisión Machine Learning; [En línea]. Disponible en: <http://www.soloentendidos.com/random-forest-2007>
- [96] Machine Learning Regresión lineal; [En línea]. Disponible en: <http://sitiobigdata.com/2019/01/19/machine-learning-regresion-minimos-cuadrados/#>
- [97] Introducción al Deep Learning; [En línea]. Disponible en: <https://iaarbook.github.io/deeplearning/>
- [98] Goodfellow Ian, Bengio Yoshua, Courville Aaron, Deep Learning, MIT Press, 2016.
- [99] Kussul E., Baidyk T., Wunsch D., Neural Networks and Micro Mechanics, Springer-Verlag, 2010, pp.210.
- [100] Baidyk T., Kussul E., Redes neuronales, visión computacional y micromecánica, ITACA-UNAM, 2009, pp.158.