

Sistema para la detección temprana de incendios forestales nocturnos en la Sierra Juárez, Oaxaca, mediante visión por computadora.

Resumen—El 70.6 % del territorio mexicano se encuentra cubierto por vegetación forestal, cuyo aprovechamiento genera el 0.23 % del PIB anual (41,803 MDP; Millones De Pesos), concentrándose esta actividad en los estados de Durango, Chihuahua, Michoacán y Oaxaca principalmente; siendo en este último estado, donde el aprovechamiento forestal es el principal sustento económico en la Sierra Juárez; cuyo principal desafío son los incendios forestales, los cuales ocasionan cuantiosas pérdidas monetarias debido a una tardía detección del fuego, lo que genera un retraso en el combate de dichos incidentes. Actualmente existen diversos métodos de detección de incendios forestales (terrestres y aéreos) siendo el más utilizado la inspección y detección visual mediante puestos de vigía terrestres, teniendo como principal limitante el error humano, el cual se acentúa en periodos nocturnos a causa de las necesidades fisiológicas del centinela. Debido a esto los sistemas de detección de incendios automatizados son una alternativa atractiva pues no dependen de las limitantes humanas. Es por esto que se presenta un sistema de detección de incendios forestales por medio de visión por computadora, el cual auxilie con la detección temprana de incendios forestales para su adecuado combate.

Palabras Clave—Detección de incendios forestales, incendios nocturnos, visión por computadora, explotación forestal, bosques, fuego. *Pinnus spp.*

Abstract—70.6% of the Mexican territory is covered by forest vegetation, which contributes 0.23% to the annual GDP (41,803 million MXN; Millions of Mexican Pesos). This activity is concentrated mainly in the states of Durango, Chihuahua, Michoacán, and Oaxaca. In the latter state, forest utilization is the primary economic support in the Sierra Juárez, where the main challenge is forest fires, causing significant monetary losses due to delayed fire detection, resulting in a delay in combating these incidents. Currently, there are various methods of forest fire detection (both terrestrial and aerial), with visual inspection and detection through terrestrial lookout posts being the most commonly used, with the main limitation being human error, which is exacerbated during nighttime due to the physiological needs of the sentinel. Due to this, automated fire detection systems are an attractive alternative as they are not subject to human limitations. Therefore, a computer vision-based forest fire detection system is presented to aid in the early detection of forest fires for their proper combat.

Index Terms—Forest fire detection, Nighttimes fires, computer vision, logging, forests, fire. *Pinnus spp.*

I. INTRODUCCIÓN

MÉXICO cuenta con 138 millones de hectáreas cubiertas por vegetación forestal, lo cual representa un 70% del territorio nacional. [9]

Los bosques cumplen una función primordial en los ecosistemas pues integran multitud de componentes a éstos, los bosques ayudan a la regulación del clima, son generadores de oxígeno, controlan la erosión del suelo así como contribuyen

en la generación y recuperación de este, auxilian en la captura de carbono y de diversos contaminantes, además de ser una fuente importante de materias primas. [5]

El pino es la principal conífera de clima templado y frío en México, se distribuye en 24 estados de la república, de los cuales sobresalen dos en la región Centro Norte del país, uno en la Occidente, uno más en el sur y dos más en el Golfo centro. [14]

La importancia económica de las masas forestales de pino en México se contabiliza por su aporte al país y su contribución al Producto Interno Bruto (PIB). En el contexto social, su relevancia se da por la población que habita en las zonas boscosas y que viven de los bienes y servicios que les proporcionan. [11]

Es importante mencionar que el 23% de los habitantes de los Estados Unidos Mexicanos (113.5 millones) viven en el sector rural [8] y que alrededor de 5.3 millones de personas viven y dependen de los bosques.[4]

En el PIB primario forestal, la actividad que más contribuye al valor económico es el corte (tala) de árboles. [8]

De entre los bienes y servicios que proveen los bosques a las familias que habitan las comunidades rurales, la madera es la de mayor relevancia por generar ingresos económicos en su aprovechamiento, sin embargo, existen otros recursos útiles, conocidos como no maderables. [10]

En Oaxaca se encuentran más de 100 comunidades forestales que realizan aprovechamiento forestal maderable y de éstas, 65 cuentan con alguna empresa forestal comunitaria. Se estima que la población que se emplea directamente en la actividad forestal maderable en el estado de Oaxaca es de 12,500 personas, las cuales pertenecen al sector indígena. [1]

El valor de la producción forestal en Oaxaca entre el 2013 y 2014 fue de 442.3 millones de pesos y 1,363 millones de pesos en la industria de la madera. [1]

Los centros eco turísticos comunitarios indígenas a través de prácticas de compartencia, organización comunitaria y economía solidaria generan alternativas para su población. [13]

La región de la Sierra Juárez, en el estado de Oaxaca, cuenta con una superficie total de 319,881 hectáreas para su aprovechamiento forestal. [2]

Un incendio forestal es un fuego que se propaga descontroladamente y consume áreas forestales, matorrales y pastizales, su poder de destrucción puede acabar con cientos de hectáreas si no es detectado y combatido a tiempo.

Los incendios forestales son una amenaza importante que afecta año con año los ecosistemas forestales de México. [7]

En el periodo de 2010 a 2020 se reportaron 53,231 incendios en México, los cuales dañaron 442 mil ha. [6]

Una revisión sobre los efectos en la salud por exposición no ocupacional al humo de incendios forestales concluyó que estos incendios tienen el potencial de inducir una carga a la salud importante. [3]

Actualmente existen diversos métodos de detección de incendios forestales, sin embargo, todos presentan en mayor o menor medida inconvenientes para ser implementados en la Sierra Juárez, Oaxaca.

Las torres de vigilancia son una de las opciones más utilizadas a nivel nacional, sin embargo requieren una inversión inicial elevada para su establecimiento y presentan un costo elevado de operatividad. [15]

Los vehículos aéreos representan otra opción, sin embargo aunado a su alta inversión inicial y al elevado costo de operación, se requiere personal capacitado para operar dichos vehículos. [9]

Los sistemas de visión por computadora que detectan incendios forestales mediante el humo provocado por estos, se presentan como las alternativas más novedosas, sin embargo presentan desventajas como las falsas alarmas causadas por nubes, niebla o el humo de incendios controlados como medidas de conservación y manejo de los bosques. [9]

II. METODOLOGÍA

II-A. Criterios para la identificación de incendios

En la Sierra Juárez, Oaxaca, la presencia de luces artificiales en medio del bosque es prácticamente inexistente, pues la orografía dificulta actividades como el senderismo y los campamentos, además de que las carreteras de acceso a las comunidades se encuentran apartadas de las zonas de explotación forestal. Por lo tanto, la presencia de luz en medio de las montañas indica la presencia de fuego, en este caso, de un incendio forestal. Los incendios forestales emiten luz, la cual fluctúa entre tonos rojos, anaranjados, blancos y amarillos los cuales son claramente visibles en la espesura de la noche.

II-B. Implementación de la visión por computadora

II-B1. Obtención de imágenes: El primer paso consiste en obtener las imágenes necesarias para poder detectar el fuego en ellas. En este caso, al ser monitoreo mediante video, las imágenes son los fotogramas. Para este proceso se deben tomar diferentes aspectos para la elección de la cámara, como la amplitud que se desee capturar, los objetos de interés a capturar, lente, etc.

II-B2. Procesamiento de imágenes: Las imágenes obtenidas se procesan y como resultado se obtienen fotogramas en los cuales, en caso de haber fuego, este aparece delimitado mediante líneas verdes. El algoritmo de detección se programó en el lenguaje Python haciendo uso del editor de texto Sublime Text, con la ayuda de la librería OpenCV. El proceso de detección del fuego comienza aplicando un filtro de media de 5 unidades a la imagen (frame) para convertirlo por separado de BGR (Blue, Green, Red; Azul, Verde, Rojo) a una escala de grises (GRAY; GRIS) y a HSV (Hue, Saturation, Value; Matiz, Saturación, Valor) que en conjunto definen un modelo de color en términos de sus componentes [12] y así poder crear máscaras para cada rango

de color y combinarlos en una sola; a esta última máscara se le aplicaron operaciones morfológicas para primero eliminar el ruido, encontrar los contornos, dibujar las líneas de color verde sobre el frame original y finalmente retornar el área iluminada. El promedio del área total iluminada se determina mediante un bucle while donde se capturan y procesan los fotogramas durante un intervalo de tiempo determinado con el fin de promediar la sumatoria de estas.

II-C. Alerta de posible un incendio forestal

El sistema de alerta temprana, se ejecuta cuando el porcentaje neto entre los promedios (actual y anterior) de las áreas iluminadas supera un cierto umbral predeterminado definido por el usuario (5% de umbral para las pruebas). Si se detecta un posible incendio, se envía cada determinado tiempo un mensaje de texto por el Servicio de Mensajería Corta (SMS) a través de internet mediante la infraestructura de comunicaciones de Twilio, se muestra una alerta visual en la pantalla LCD (Liquid Crystal Display; Pantalla de Cristal Líquido).

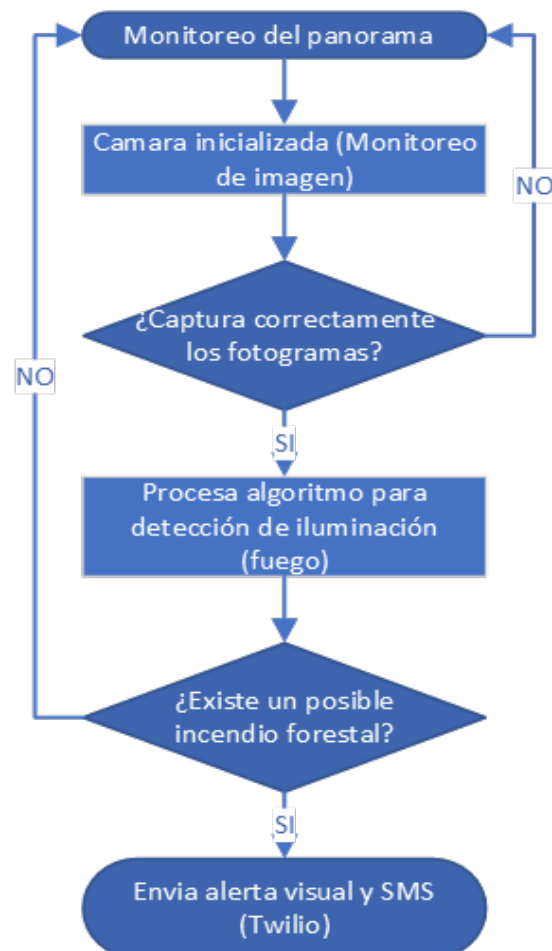


Ilustración 1: Diagrama de flujo del programa.

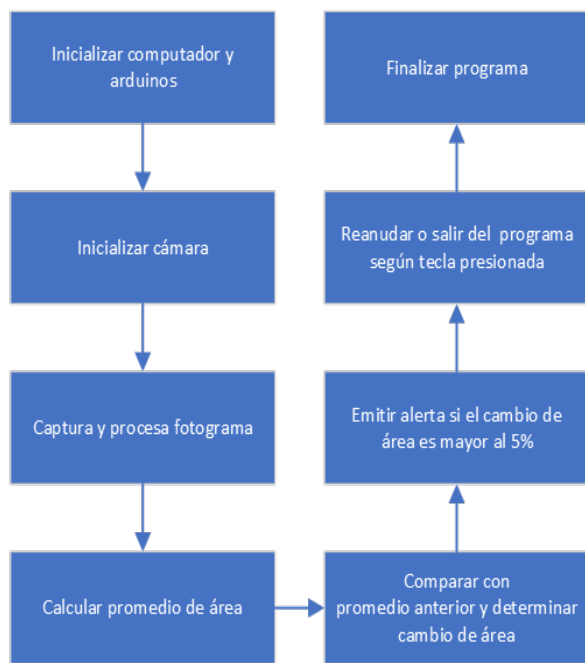


Ilustración 2: Diagrama de bloques.

Pseudo código del programa en Python:

```

ALGORITMO Principal():
    DetecciónIncendiosForestales()
  
```

```

FUNCIÓN enviar_alerta(mensaje):
    Crear mensaje con la API de Twilio y enviarlo
  
```

```

FUNCIÓN detectar_iluminación(entrada: imagen -frame-):
    REDIMENSIONAR entrada a 800x600.
    APLICAR filtro de desenfoque mediano a entrada.
    CONVERTIR entrada a escala de grises (GRAY) y HSV.
    BINARIZAR entrada GRAY usando umbralización adaptativa.
    DEFINIR los rangos de colores del HSV.
    CREAR máscaras para cada rango de color incluyendo a GRAY.
    COMBINAR las máscaras.
    APLICAR operaciones morfológicas para eliminar el ruido.
    DETECTAR contornos en la imagen binarizada.
    RETORNAR imagen con contornos y área total iluminada.
  
```

```

FUNCIÓN calcular_promedio_área(intervalo):
    Calcular el promedio del área iluminada durante un intervalo.
  
```

```

FUNCIÓN ejecutar():
    Inicializar dispositivos (embebidos) y
  
```

variables necesarias

Mientras verdadero:

```

    Comparar promedio anterior del área durante un intervalo con el actual.
    Si cambio de área mayor a umbral:
        Enviar alerta si contador de alertas es menor al máximo
        Actualizar contador de alertas
    Actualizar promedio anterior con el actual
    Detectar pausa y salida del programa
  
```

```

FUNCIÓN configurar_parámetros():
    Solicitar al usuario los parámetros del sistema
  
```

```

Inicializar el sistema
Ejecutar el algoritmo principal
  
```

Pseudo código de Arduino UNO para mover el servomotor de la cámara web:

```

INICIAR:
    Inicializar servo motor.
    Leer opción desde el puerto serial.
  
```

```

BUCLE_PRINCIPAL:
    Si el movimiento del servo está activado:
        Mover servo gradualmente hacia adelante.
        Esperar 1 segundo.
        Mover servo gradualmente hacia atrás.
        Esperar 1 segundo.
    FIN
  
```

Pseudo código de Arduino UNO para alerta visual en la pantalla LCD:

```

INICIAR:
    Inicializar servo motor.
    Inicializar pantalla LCD.
    Mostrar mensaje de encendido en la LCD.
  
```

```

BUCLE_PRINCIPAL:
    Si hay datos disponibles en el puerto serial:
        Leer el dato recibido.
        Si el dato es 'A':
            Mostrar mensaje de posible incendio en la LCD durante 5 segundos.
        Si el dato es 'B':
            Mostrar mensaje de escaneando en la LCD.
    FIN
  
```

II-D. Implementación del prototipo

Para la creación del prototipo del sistema propuesto para la detección de incendios forestales durante la noche se necesitan los siguientes elementos.

II-D1. Cámara: Cámara web Kiiyer KUI 112 2K 30 FPS para el monitoreo mediante video y la obtención de fotogramas.

II-D2. Motor: Servomotor MG90S de corriente continua con un voltaje de operación de 4.0 a 7.2 volts, un torque de 10 kg/cm y un tamaño de 40.8 mm x 19.8 mm x 42.9 mm.

II-D3. Placa Arduino Uno: La placa Arduino Uno es una plataforma de prototipado de código abierto que utiliza un microcontrolador ATmega32P de 8 bits con 14 pines de entrada/salidas digitales, 6 pines de entrada analógica y capacidad de comunicación USB.

II-D4. Módulo de visualización LCD: La pantalla LCD es un dispositivo de visualización de datos alfanuméricos. Ofrece una interfaz simple con capacidad de mostrar textos, números y símbolos.

II-D5. Potenciómetro: Potenciómetro de control de intensidad de luminosidad para el módulo de visualización LCD.

II-D6. Ordenador portátil: Proporciona energía al sistema y ejecuta los algoritmos para la detección de fuego.

El dispositivo debe ubicarse en la copa de un pino estratégicamente seleccionado por su altura y por su posición la cual permita la visualización de una montaña de interés.

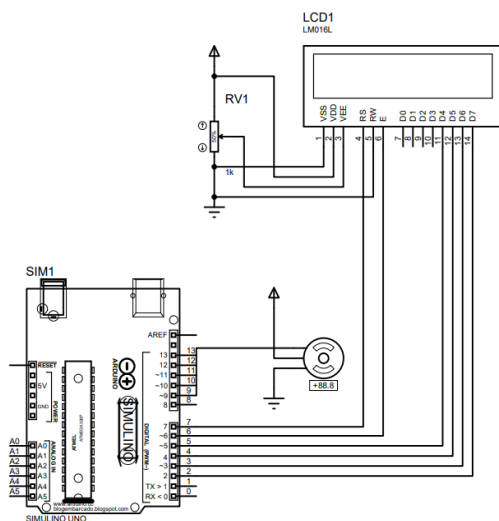


Ilustración 3: Diagrama de circuitos.

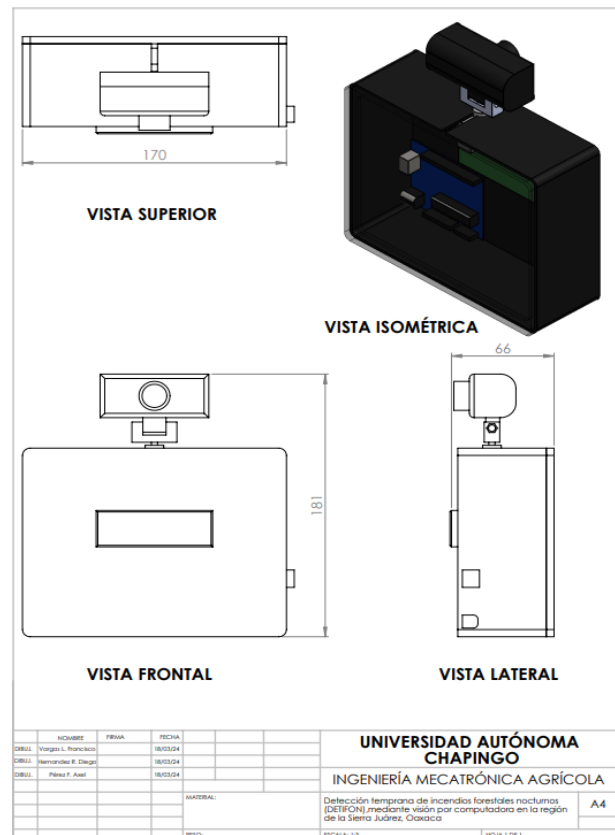


Ilustración 4: Diseño en SolidWorks del prototipo.

El anclaje del prototipo al pino seleccionado se realiza mediante una viga en voladizo empotrada en el pino y teniendo en el extremo contrario al dispositivo anclado. El pino seleccionado debe tener una altura de al menos 35 metros para garantizar una correcta cobertura del panorama. La viga debe tener 4 metros de longitud, para garantizar que la cámara no se vea obstruida por las acículas del pino, aunado a esto debe existir un previo derrame de éste con la finalidad de mejorar el campo de visión de la cámara integrada en el dispositivo. El material seleccionado para la viga es el aluminio ya que cuenta con una serie de ventajas como el ser altamente resistente a la corrosión, su peso y su facilidad de maquinado. La viga seleccionada tiene como dimensiones: 0.5 cm x 10 cm x 400 cm. El peso de la viga es de 5.4 Kg tomando en cuenta una densidad de 2.7 g/cm^3 lo cual significa que la viga tiene un peso de 5.4 Kg. El dispositivo tiene un peso de 600 g. Con estos datos obtienen los diagramas de esfuerzo pertinentes.

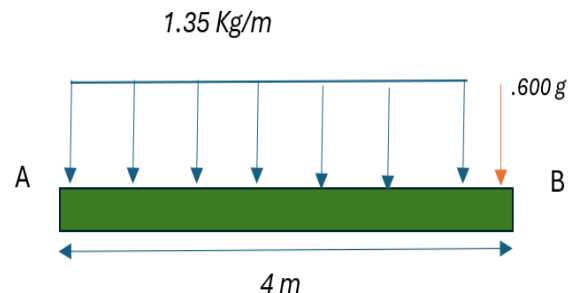


Ilustración 5: Diagrama de análisis de fuerzas.

Condiciones de equilibrio:

$$\sum F_x = 0$$

$$A_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - 5.4kg - .6kg = 0$$

$$A_y = 6kg$$

$$\sum M_A = 0$$

$$M_A - (.6kg)(4m) - (5.4kg)(2m) = 0$$

$$M_A = 13.2kg$$

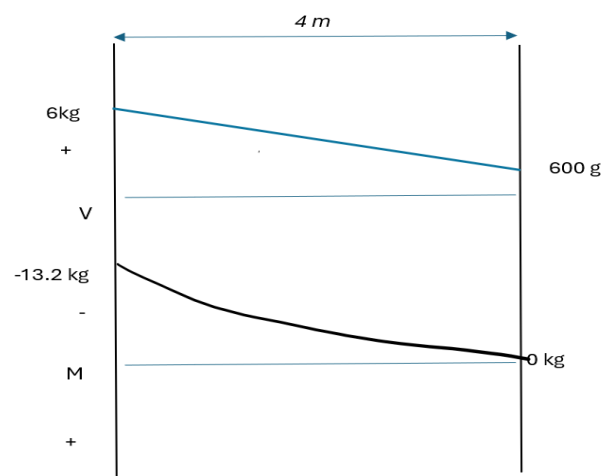


Ilustración 6: Gráfica de análisis de esfuerzos.

III. RESULTADOS

Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos se realizaron mediante videos de incendios forestales en distintas partes del mundo a falta de una base de datos con videos de incendios forestales exclusivos de la Sierra Juárez, Oaxaca.

De cada video se seleccionaron los fotogramas en los que el fuego es más visible.

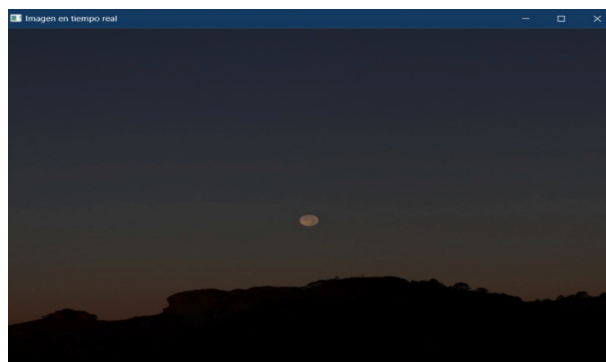
Prueba 1:



Ilustración 7: Incendio detras de una montaña.

El programa detecta la presencia de fuego detrás de la montaña presente en el fotograma, lo cual es correcto pues en el video original el fotograma seleccionado corresponde a un incendio forestal.

Prueba 2:



Ilustracion 8: Montaña iluminada por la luz de la luna.

El programa no detecta la presencia de fuego, lo cual es correcto ya que el video original muestra a la luna sobre una montaña como única fuente de luz.

Prueba 3:

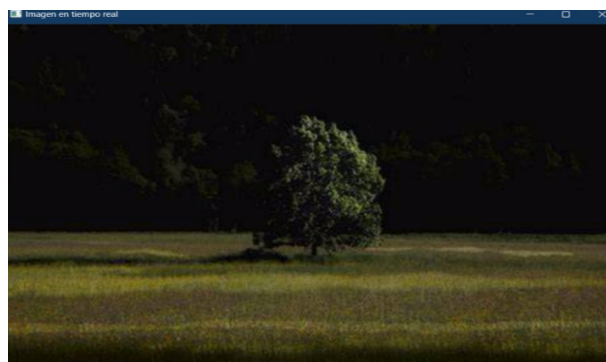


Ilustración 9: Pino iluminado por la luz de la luna.

El programa no detecta la presencia de fuego, lo cual es correcto ya que en el video original únicamente se muestra un árbol iluminado por la luz de la luna.

Prueba 4:



Ilustración 10: Incendio en medio de un campo de maíz.

El programa detecta la presencia de fuego en medio de un campo de maíz, delimitado mediante líneas de color verde.

Prueba 5:



Ilustración 11: Incendio forestal, Tenerife, España.

El programa detecta la presencia de un incendio forestal de forma correcta, enmarcándolo mediante líneas verdes las zonas en donde se encuentra el fuego, el cual ha comenzado a propagarse.

Prueba 6:



Ilustración 12: Incendio de pastizal y subterráneo.

El programa detecta la presencia de un incendio de pastizal y subterráneo (enmarcado en líneas verdes) propagándose por la ladera en Santa Maria Tecuanulco, Texcoco de Mora.

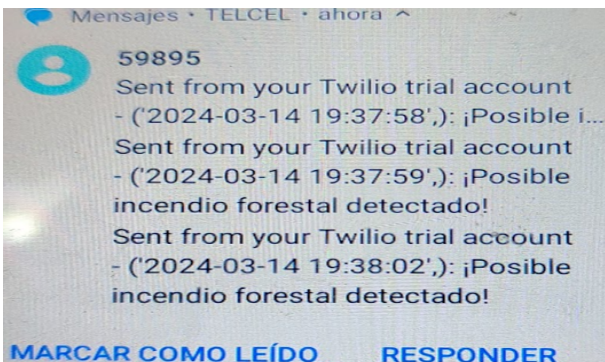


Ilustración 13: Mensaje recibido por el teléfono celular.

En los casos en los cuales el programa detecta la presencia de un incendio forestal (fuego), envía una alarma mediante un mensaje de texto corto a un número de teléfono preestablecido mediante la infraestructura de comunicaciones y API de Twilio con la fecha, hora y la leyenda de ¡Posible incendio forestal detectado!

IV. CONCLUSIÓN

Los incendios forestales representan un gran peligro para los bosques y para los seres vivos que dependen de éstos, en especial para las personas cuyo principal ingreso está

relacionado con la explotación maderera. La Sierra Juárez en el estado de Oaxaca es el ejemplo perfecto de esto. Los métodos de detección de incendios forestales ya existentes no se han podido implementar en esta región debido a una variedad de inconvenientes socioeconómicos. Se presenta un sistema que con ayuda de la visión por computadora auxilie en la tarea de detección temprana y posterior combate de incendios forestales presentados en el periodo nocturno con el objetivo de reducir las pérdidas económicas y ecológicas que este tipo de siniestros representan.

V. REFERENCIAS

- [1] Anta Fonseca, S. (2016). CV Forestal. Recuperado de <https://www.oaxaca.gob.mx/coplade/wp-content/uploads/sites/29/2017/04/Perfiles/AnexosPerfiles/4>.
- [2] Aquino Vásquez, C. (2017). Territorio e instituciones de acción colectiva en la gestión forestal comunitaria en la Sierra Juárez Oaxaca (Tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, México, Puebla.
- [3] Barría P., R. Mauricio. (2019). Los incendios forestales como una problemática de salud pública: un ámbito para la enfermería en desastres. Investigación y Educación en Enfermería, 37(3), e01. <https://doi.org/10.17533/udea.iee.v37n3e01>
- [4] Comisión Nacional de Población (Conapo). (2015). Proyecciones de la población de México: Indicadores demográficos. Recuperado de <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones> (Fecha de acceso: 12 de marzo de 2024)
- [5] Gobierno de México. (s.f.). Importancia de los ecosistemas forestales: especies de los bosques y selvas. Recuperado de <https://www.gob.mx/profepa/articulos/importancia-de-los-ecosistemas-forestales-especies-de-los-bosques-y-selvas?idiom=es>
- [6] González-Rosales, Andrés, Ortiz-Paniagua, Carlos Francisco. (2022). Superficie forestal afectada por incendios en México: apuntes iniciales hacia un modelo de manejo preventivo. Revista de Ciencias Ambientales, 56(1), 1-27. <https://dx.doi.org/10.15359/rca.56/1.1>
- [7] Gómez Reyes, Víctor Manuel, Tinoco Molina, Ornar, Terrón Alfonso, Arsenio, Gómez Peralta, Marlene, Tena Morelos, Carlos A., Garza Ocañas, Fortunato. (2014). Efecto de los incendios forestales en la riqueza y composición de macromicetos. Revista mexicana de micología, 39, 21-30. Recuperado en 10 de marzo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-31802014000100004&lng=es&estlng=es.
- [8] Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi). (2016b). Sistema de Cuentas Nacionales de México. Cuentas de Bienes y Servicios. México. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/pibact/2003/> (Fecha de acceso: 6 de marzo de 2024).
- [9] Martín-Borregón Domenech, D. (2012). Sistema de detección de incendios forestales utilizando técnicas de procesamiento de imagen (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica de Cataluña, España, Barcelona.
- [10] Martínez-López, J., Molina-Luna, N.G., Rangel-Landa, S., Aquino-Vázquez, C., Acosta-Ramos, A.. (2022).

Valor cultural de los recursos forestales no maderables en comunidades Zapotecas de la Sierra Juárez de Oaxaca. *Polibotánica*, (53), 239-259. Epub 04 de abril de 2022. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.53.16>

[11] Moctezuma López, G., Flores, A. (2020). Importancia económica del pino (*Pinus* spp.) como recurso natural en México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 11(60). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.720>

[12] Ortiz, M. M. (2013). Procesamiento de imágenes. Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Computación. México.

[13] Rosas-Baños, Mara, Correa-Holguín, David A.. (2016). El ecoturismo de Sierra Norte, Oaxaca desde la comunalidad y la economía solidaria. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 13(4), 565-584. Recuperado en 15 de marzo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722016000400565&lng=es&estlng=es.

[14] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2002-2016). Anuarios Estadísticos de la Producción Forestal. México, D.F., México. pp. 1-176. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/anuarios-estadisticos-forestales> (Fecha de acceso: 7 de marzo de 2024).

[15] Tapia, Gonzalo, Castillo, Miguel. (2014). Propuesta de diseño de un sistema de torres de detección de incendios forestales: aplicación a la región Metropolitana de Chile central. *Bosque (Valdivia)*, 35(3), 399-412. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002014000300014>