

SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA TERREMOTOS: Una propuesta innovadora y económica basada en Smartphones

Oscar M. Zambrano¹, Manuel Esteve², Carlos Palau³ y Ana M. Zambrano⁴

Escuela Politécnica de Valencia

¹oszamvi@doctor.upv.es

²mesteve@dc.com.upv.es

³cpalau@dc.com.upv.es

Escuela Politécnica Nacional

⁴ana.zambrano@epn.edu.ec

Resumen—En este artículo se presenta una arquitectura innovadora y económica para un sistema de alerta temprana para terremotos basados en teléfonos inteligentes o smartphones. Se propone una arquitectura jerárquica de tres capas que aprovecha las capacidades multi-sensor y multi-red de los teléfonos inteligentes para conformar una red de seguridad pública que permita la detección de eventos sísmicos de gran magnitud en tiempo real, y la alerta temprana de dicho evento al o los núcleos sociales involucrados. El objetivo principal de esta investigación es proporcionar el tiempo requerido a los afectados por un terremoto, para que puedan tomar mejores decisiones y acciones que impliquen la mitigación de los efectos dañinos de un evento sísmico de gran escala. También se propone una gestión post evento que colabore con los procesos de respuesta y recuperación. La validación de la arquitectura se ha realizado por medio de una simulación que toma como base la información sísmica proporcionada por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (IGEPN), obteniendo importantes y prometedores resultados, alertando hasta con decenas de segundos de antelación en el lugar del epicentro, reduciendo los falsos positivos, y pudiendo incrementar significativamente este tiempo en lugares más alejados.

Términos para Indexación— Alerta Temprana, Gestión de Emergencias y Desastres, Redes de Seguridad Pública, Sistema de Alerta Temprana para Terremotos.

I. INTRODUCTION

El vertiginoso desarrollo de la tecnología y un aumento en cuanto a la importancia de la Gestión de Emergencias y Desastres (GED) en los últimos años, han permitido mejoras significativas en la manera de cómo enfrentar los desastres naturales, pasando de una acción pública caracterizada por medidas improvisadas y respaldada por las capacidades de respuesta del Estado, a un modelo de gestión integral, caracterizado por su capacidad de prevención y adaptación a las condiciones hostiles de los ambientes emergenciales, apalancado por la agilidad y efectividad de su Sistema de Gestión de Emergencias y Desastres (SGED) y sus Redes de Seguridad Pública (RSPs) [14].

La Alerta Temprana (AT) se puede definir de manera general como un *mecanismo de advertencia de peligro*. Para esto, se requiere de planes y procesos desarrollados e implementados sobre la base de una conciencia situacional realista y oportuna, resultante del monitoreo y control continuo

y permanente del entorno de operaciones, así como de una efectiva interacción y comunicación entre todas las partes interesadas y la comunidad en general. Hace referencia a todos aquellos procesos relacionados con la identificación y evaluación de amenazas y riesgos presentes en el medio ambiente, así como a la comunicación e intercambio oportuno de información al momento de materializarse uno de esos riesgos. Un Sistema de Alerta Temprana (SAT) es un conjunto de recursos y procesos que permite llevar a cabo la AT, colaborando con el desarrollo de las capacidades de prevención, preparación y protección. El objetivo principal de un SAT es el otorgar el tiempo necesario al núcleo social afectado por un desastre, para prevenir y mitigar los posibles daños que se puedan producirse, y proteger la vida e integridad de las personas. Los SATs han ganado notoriedad en los últimos años debido a su roll clave respecto a la reducción de pérdidas humanas, materiales y ambientales al momento de hacer frente con un desastre.

La actividad sísmica es uno de los desastres naturales más frecuentes y destructivos, produce anualmente miles de millones de dólares en pérdidas en bienes materiales y peor aún, en vidas humanas. Más del 80% de los terremotos terrestres se originan en la zona del cinturón del Pacífico (área de montaña y zonas volcánicas delimitadas por el Océano Pacífico); terremotos como el de Ecuador en 1949, Colombia en 1999, Perú en 2007, y Chile en 2010, todos ellos dejado al menos 8.000 muertes en cuestión de sólo segundos. A pesar de esto, algunos países como el Ecuador [20], cuyos datos sísmicos se ha utilizado para validar nuestra propuesta, no cuentan todavía con un SAT adecuado en caso de un terremoto o sismo de gran magnitud. Por tanto, la implementación de un SAT ágil, eficaz y funcional, acorde con los recursos disponibles de países en vías de desarrollo y que se encuentren en riesgo sísmico permanente como el Ecuador, se convierte en una necesidad vital.

Este documento presenta una solución real y de bajo costo para la implementación de un Sistema de Alerta Temprana para Sismos y Terremotos (SATT), basado en la utilización de los teléfonos inteligentes o smartphones (SPs) como acelerógrafos, para detectar oportunamente eventos sísmicos de gran magnitud, y posibilitar diferentes alternativas de comunicación en presencia de un desastre. Se propone una RSP confiable, escalable y adaptable, bajo una arquitectura jerárquica de tres

capas, que permita la obtención de datos en tiempo real, basada en una red inalámbrica de sensores conformada por los SPs de los usuarios finales, la misma que entre más grande, más confiable y precisa será. Los SPs son el elemento central de esta arquitectura, son dispositivos polivalentes y multi-sensor, y aunque su capacidad de sensorización es menor comparada con la del hardware sísmico específico, también es cierto que económicamente es imposible para un Estado contar con cientos de miles de sensores que cubran la totalidad de su territorio.

El desarrollo tecnológico actual ha facilitado la disminución de costos y masificación de los SPs. A finales de 2013, el número de dispositivos móviles conectados superó el número de personas alrededor del mundo, y para el 2017 habrá cerca de 1,4 dispositivos móviles por habitante, lo que significa más de diez millones de dispositivos móviles conectados, entre estos, sistemas máquina a máquina (M2M), los cuales superarán la población mundial en ese momento (7,6 mil millones) [6].

De manera implícita en esta arquitectura, está la necesidad de integrar y analizar la información proveniente de la red de sensorización, para poder obtener una conciencia situacional precisa, real, y poder identificar los eventos sísmicos verdaderos de los movimientos habituales de los usuarios. Este documento presenta una arquitectura para la implementación de un SATT, que parte del modelo de fusión de datos JDL (Joint Directors of Laboratories) [24], modelo que fue diseñado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD9) en 1997.

La arquitectura jerárquica que se muestra en la Fig. 1 y 2, inicia con la *capa-1*, correspondiente a una aplicación SP (*quake*), de bajo consumo de energía, desarrollada para sistemas operativos no propietarios Android, y que permite la distinción entre los movimientos de los usuarios habituales y un evento sísmico real. La *capa-2* está compuesta por un servidor con los suficientes recursos de HW y SW para procesar todos los datos provenientes de los SPs que posean instalada la aplicación SP. Este servidor llamado Servidor Intermedio (SI), realiza un análisis espacial y temporal de las muestras procedentes de todos los nodos de sensorización utilizando una combinación de métodos matemáticos que no han sido considerados hasta el momento en otras investigaciones. La contribución principal de esta investigación, está en el proceso de detección de los eventos sísmicos en tiempo real, lo que permitirá el envío de notificaciones oportunas a los usuarios de los SPs de *capa-1*, que permitirá obtener minutos u horas adicionales para una mejor planificación y toma de decisiones que podrían marcar la diferencia entre la vida y la muerte de los afectados. Por último, la tercera y última capa, representa el Centro de Control (CC), el cual permite la gestión del incidente, durante y posterior al mismo, ayudando a los centros de emergencias y usuarios a tomar mejores decisiones, optimizar el tiempo y los recursos disponibles.

El precautelar la vida e integridad de las personas tiene un valor incalculable y está en nuestras manos saber cómo protegerlas de incidentes dañinos. Poseer un mecanismo de apoyo a los procesos de prevención, preparación y protección es tan importante como tomar buenas decisiones durante y

después de un desastre. Por esta razón, también se prevé una fase de gestión posterior al evento, donde cada SP ayuda al CC mediante el envío de la información complementaria como comentarios, fotos, videos, etc., colaborando con los procesos que permiten alcanzar una conciencia situacional global, acorde con la evolución del desastre y cambios del entorno.

El presente documento está organizado de la siguiente manera: en primer lugar, se exponen las razones que motivaron la realización de esta investigación y los fundamentos sobre los que se asienta la misma. En la siguiente sección, la arquitectura propuesta es detallada y justificada, explicando la cadena de procesamiento de señales en los SPs, el SI y el CC. Por último se presentan las conclusiones de nuestro trabajo.

II. MOTIVACIÓN

Cuando se produce un evento sísmico, el tiempo disponible para precautelar la vida e integridad de las personas es crítico, puede marcar la diferencia entre la vida y la muerte de los afectados, y está directamente relacionado con la rapidez con la que se detecta y reporta el incidente dañino [15]. Este es el objetivo principal de los SAT y de esta arquitectura en particular: *obtener el tiempo necesario que permita proteger vidas humanas y garantizar su integridad.*

El Marco de Acción de Hyogo [26] hace hincapié en la necesidad de identificar y evaluar los riesgos de desastres y potenciar la alerta temprana. Gobiernos locales, nacionales, y organismos internacionales relacionados con la GE, están haciendo esfuerzos importantes para incorporar a los SAT como componentes integrales en sus SGE y RDP. Las principales funcionalidades de un SAT son la detección y predicción de desastres naturales extremos inminentes, con el fin de alertar e informar oportunamente a toda la comunidad de sus características.

Un SAT para terremotos (SATT) basa su funcionamiento en la identificación de eventos sísmicos extremos, y en la alerta y difusión de información en los primeros segundos de su ocurrencia. Esto permite alertar a la población en riesgo de la presencia del incidente sísmico gran magnitud, antes de que las ondas expansivas de mayor amplitud lleguen a la o las localidades en riesgo, lo que permite a las autoridades y la comunidad en general, tomar decisiones y medidas para prepararse, prevenir y mitigar sus efectos. Como ejemplo, en 1995 un terremoto de magnitud 8.0 en la de Richter sacudió la ciudad de México, miles de vidas pudieron ser salvadas gracias a la utilización de un SATT, el cual permitió alertar a la población con aproximadamente cincuenta segundos por delante de las ondas destructivas [1].

La arquitectura propuesta se ha desarrollado utilizando una plataforma de código abierto, lo cual permitirá la adaptación, modificación y personalización de esta solución a las necesidades de la región y la población en cuestión, convirtiéndose en una RSP que en caso de un evento sísmico de gran magnitud, cuando muchas de las redes de comunicación se pierden, pueda encontrar y ofrecer una alternativa disponible que permita las operaciones de respuesta y recuperación (Wi-Fi, WiMAX, 3G, 4G). La aplicación SP ha sido desarrollada usando software libre (Java sobre Android), eliminando la

dependencia de una plataforma propietaria o de terceros. La aplicación debe realizar la sensorización y reunir los datos de forma transparente para el usuario, siempre teniendo en cuenta la optimización en el uso de la batería e identificando claramente los picos sísmicos de los movimientos habituales del usuario. La principal contribución de esta arquitectura y su diferencia con los anteriores trabajos está en la segunda capa, la cual manipula, integra y procesa las muestras usando el algoritmo de ventana deslizante Kruskal Wallis ANOVA [16], y MQTT (Message Queue Telemetry Transport) [12] como protocolo de mensajería para el intercambio de información y notificación de alertas en tiempo real. Otra contribución en el análisis espacial de las muestras por medio de las ecuaciones de atenuación y fórmula de distancia de Haversine [19], con el fin de encontrar el óptimo rango (distancia de radio) que cada SI debe cubrir para aceptar muestras, para mejorar el proceso de correlación y ser más preciso. Todos estos procesos se explican adecuadamente en las próximas secciones. Por último, otra de las ventajas es la adición de una tercera capa (CC) que permite la gestión posterior al evento para colaborar con los centros de ayuda y emergencias, y todas las partes interesadas, a tomar mejores decisiones y mejorar los tiempos de respuesta durante y después de un terremoto.

III. ARQUITECTURA

Es necesario recolectar y validar la información dentro de la red de sensores inalámbricos (capa-1) utilizando un proceso de integración de datos también llamado *fusión de datos*, que corresponde a los eventos reales, referidos en este caso a la intensidad y aceleración del terremoto, dentro de una presentación de datos consistente, precisa y útil. Esta arquitectura es un ejemplo de la fusión de sensores múltiples, teniendo en cuenta dos premisas importantes: (a) La fusión de datos procedentes de fuentes no fiables (fiabilidad <0,5%), no resulta en una mejoría. (b) La fusión de datos procedentes de fuentes precisas (fiabilidad <0,95%), no resulta en una mejoría significativa. En conclusión, si los sensores no son suficientes o demasiado precisos, no tiene sentido invertir tiempo y esfuerzo en esta solución. A partir de estas dos premisas, la fusión de datos en esta RSP está justificada, ya que los SPs, aunque ni siquiera se acercan a la precisión de los dispositivos sísmicos específicos, mantienen una precisión aceptable y adecuada para esta arquitectura. Esto también se llama Multitud de detección [21] que hoy en día está siendo ampliamente investigada.

Es importante tener en cuenta que el modelo JDL se divide en niveles, que no tienen relación con las diferentes capas de la arquitectura propuesta, es más, las capas de la arquitectura pueden cubrir varios niveles del modelo JDL. Por lo tanto, estos dos términos, capas y niveles, no deben ser confundidos. El modelo JDL cubre perfectamente las tres capas de esta arquitectura y permite cumplir con una fusión de datos segura y ágil.

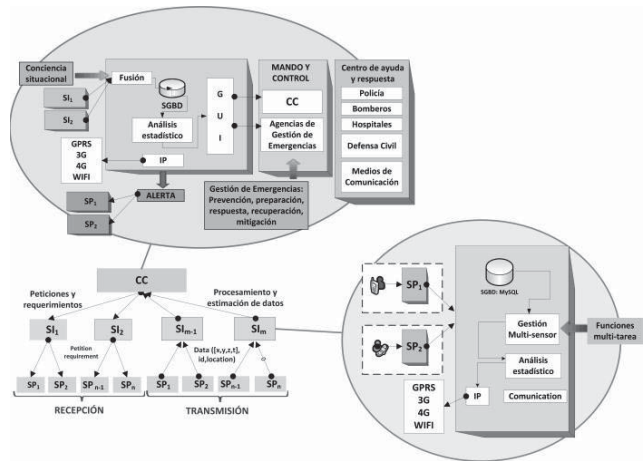


Fig. 1. Arquitectura.

Dentro de la arquitectura podemos destacar los siguientes elementos:

- *Fuentes de datos*: son aquellos dispositivos que suministran la información, por tanto, representan cada uno de los sensores de capa-1 en la arquitectura jerárquica, dicho en otras palabras, todos los SPs con la aplicación "e-quake" instalada.
- *Interacción Persona-Sensor*: es la aplicación móvil denominada "e-quake" y que permite la transmisión de la información obtenida de la manera fácil y eficiente.
- *DBMS*: El sistema de gestión de base de datos donde se recoge toda la información. Para nuestra investigación se ha utilizado MySQL como motor para la base de datos.

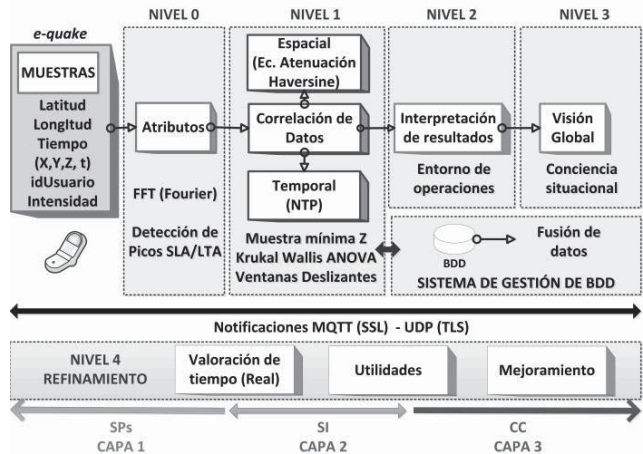


Fig. 2. Modelo JDL.

El modelo JDL por su parte, está compuesto por cinco niveles de procesamiento, junto con una conexión de bus de datos entre los componentes, que se muestran en la Fig. 2 [24].

-- *Nivel 0, Fusión de señal*: permite reducir la cantidad de datos y mantener sólo la información útil. Este es un proceso de segundo plano que se realiza sobre los SPs en la red de capa-1.

-- *Nivel 1, Evaluación de muestras*: la validación espacial y temporal de los datos. Este nivel corresponde a la capa 2 en la arquitectura jerárquica y ha sido desarrollada a través de dos potentes lenguajes de programación: Java y Matlab. Esta

aplicación se encuentra en el SI, es capaz de evaluar y validar toda la información procedente de los SPs, y determinar si se ha producido un evento sísmico real o no.

-- Nivel 2, *evaluación la situación*: realizado por el CC en la capa-3, nos permite obtener una conciencia situacional del entorno.

-- Nivel 3, *Evaluación del impacto*: identifica los riesgos, amenazas y vulnerabilidades en el entorno de operaciones. Califica el nivel de riesgo de las actividades detectadas en el nivel 2 y 3.

-- Nivel 4, *Refinamiento del proceso de fusión*: optimiza el proceso de fusión de datos y supervisa el rendimiento del sistema.

La arquitectura jerárquica se compone de tres capas: la primera es básicamente una red de nodos de sensores que recogen datos de los SP (*x, y, z aceleraciones; latitud, longitud, fecha, hora, magnitud e intensidad*); la segunda, compuesta de ordenadores (servidores) con suficientes recursos para recibir y enviar datos a todos los SPs que están dentro de su rango de cobertura y también a la tercera capa; la tercera está compuesta por el CC que obtiene una visión real, actual y global de la situación, siendo responsable de organizar y ordenar toda la arquitectura y manejar la gestión de los centros de ayuda. La arquitectura tiene las siguientes características:

-- Mantenimiento simple: ya que la salud de cada sensor es responsabilidad del usuario, el mismo que sólo tiene que tomar unos segundos para instalar o actualizar la aplicación.

-- Adaptable y escalable: Entre más nodos se tengan, habrá más procesamiento en la SI, sin embargo, los SPs no percibirán la diferencia entre cien, mil o incluso diez mil nodos en el sistema. La arquitectura permite la entrada de nuevos SI con el fin de ayudar a procesar las solicitudes y notificaciones de los servidores que lo necesiten, y para la comunicación utiliza un protocolo ligero que realiza un consumo mínimo de recursos de los SI.

-- Agilidad: lograda mediante el uso de protocolos de tiempo real y tecnologías para la expiración y validación de datos.

-- Seguridad: los SPs envían información personal de los usuarios, y ésta podría ser interceptados durante la comunicación y ser mal utilizada. Se propone TLS como mecanismo de seguridad para apoyar el intercambio de datos seguro a través de UDP y MQTT.

-- Estándar: mediante el uso de protocolos y tecnologías estándar en todos los dispositivos de la capa y COTS como la electrónica de consumo hardware de red y los teléfonos inteligentes.

-- Sincronización de tiempo: NTP (Network Time Protocol) se utiliza para la sincronización de reloj entre las capas y dispositivos, donde el CC se define como Estrato 0 servidor NTP.

Entre los SPs y los IS, se prevén varias tecnologías de la comunicación debido a las capacidades multi-interfaz de los SPs actuales (WiFi, GPRS, WiMAX, 3G o 4G). Desde el punto de vista de aplicación, se puede saltar sin problemas de una red de comunicación a otra, si se detecta la pérdida de conectividad. Las comunicaciones tienen que ser rápidas y eficientes, por esta razón que se adoptado el protocolo MQTT

(Message Queue Telemetry Transport), que es un protocolo de mensajería M2M, extremadamente ligero y que consume muy pocos recursos (CPU y ancho de banda). Es ideal para aplicaciones móviles, debido a su pequeño tamaño, bajo consumo de energía, paquetes de datos pequeños, y la distribución eficiente de información a uno o varios receptores.

Entre el SI y el CC, el escenario de comunicaciones se vuelve menos táctico, pero incluso ahí, los enlaces de datos pueden sufrir daños, por lo que se pueden utilizar enlaces satelitales como alternativa. Las comunicaciones son siempre en tiempo real, por lo que se ha utilizado UDP [19] como protocolo de transporte a fin de evitar las retransmisiones y procesos orientados a conexión.

A. Aplicación cliente y procesamiento de aceleración

La aplicación SP debe ser simple, no interferente, consumir muy poca batería, así como un buen ayudante durante y posterior a la ocurrencia de un terremoto, a fin de colaborar con los gestores de crisis para tomar buenas decisiones. En cuanto a la aplicación, el sistema operativo Android fue elegido debido a las siguientes ventajas:

-- Tiene una fuerte posición en el mercado garantizando una gran cantidad de usuarios potenciales.

-- Es de código abierto, lo que elimina la dependencia de terceros y facilita su personalización.

-- El desarrollo de la aplicación es relativamente fácil, y

-- Tiene un ciclo de vida adecuadamente manejable.

La aplicación ha sido desarrollada para adaptarse a las capacidades y limitaciones de una plataforma API de Google 2.2 asegurando que más del 95% de los usuarios que utilizan el sistema operativo Android [8] sean capaces de instalarla sin problemas. Hay que tomar en cuenta, que uno de los objetivos es alcanzar la mayor cantidad posible de nodos para darle confiabilidad al sistema. Las versiones de la aplicación móvil para Windows Mobile y iOS están actualmente en desarrollo.

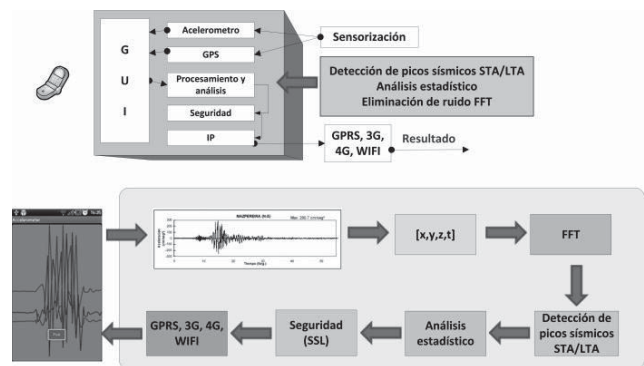


Fig. 3. Proceso de aceleración.

La Fig. 3 muestra un diagrama de bloques que define el proceso cuando la SP está actuando como un acelerógrafo utilizando sus capacidades de sensorización y de comunicación. La aplicación SP se denomina "e-quake", consiste en una interfaz gráfica de usuario (GUI) para el seguimiento de los sensores y determinar si un movimiento repentino o abrupto representa un posible evento sísmico. La

aplicación "e-terremoto" debe desarrollar las siguientes características para el éxito y aceptación del sistema:

-- *Percepción de los usuarios:* es importante que la aplicación sea intuitiva, fácil de usar y de entender. Sin embargo, vale la pena señalar que la mayoría de las funciones que debe realizar (sensorización y procesos matemáticos) se encuentran en segundo plano, por lo que no necesitan la interacción con el usuario.

-- *Operación transparente:* la aplicación tiene que tener control y rápida respuesta a los fallos que se puedan presentar, y continuar operando de forma transparente para el usuario. La aplicación debe hacerse de tal manera que no interrumpa el uso cotidiano del equipo. Para el usuario debe ser casi imperceptible que tiene una nueva aplicación instalada.

-- *Bajo consumo de energía:* es fundamental y ha sido uno de los más considerados en el proceso de diseño; la aplicación se ha perfilado pensando en la mejor manera de resolver el consumo de energía en el SP. De lo contrario podría suceder que el usuario descarta "e-quake" debido a su consumo de recursos indiscriminado.

-- *Gratuidad:* para asegurar la mayor cantidad de usuarios, y mejorar el desempeño del SATT.

-- *SopORTE posterior al evento:* además de ser un buen gestor pre-evento, el SP debe ser desarrollado para comportarse como un eficiente gestor post-evento, que permita al usuario responder fácilmente, recibir información de las otras capas de la arquitectura y obtener una conciencia situacional real, actual y global, para tomar de decisiones acertadas.

Con el fin de cumplir con todos los ítems anteriormente enumerados y para que el SP pueda comportarse como un acelerógrafo tiene que implementarse el proceso matemático que se muestra en la Fig. 3, el mismo que se detalla a continuación: Con el fin de trabajar con señales sísmicas que van de 1 a 10 Hz, el intervalo de muestreo debe ser 0,05 segundos; por lo tanto, las muestras deben ser tomadas veinte veces por segundo. Aunque aparentemente es una gran velocidad de muestreo, en realidad no es, teniendo en cuenta que un acelerómetro convencional puede tomar alrededor de 35 a 40 muestras por segundo. Los picos indicarán si se ha producido un evento sísmico. Éstos deben ser manejados con cuidado para evitar falsos positivos que causen un caos innecesario en la zona y los más importante, la pérdida de credibilidad en el SATT. El dominio del tiempo no es suficiente para procesar adecuadamente la señal, por lo que un proceso de fondo recoge muestras de aceleración y, por medio de la Transformada Discreta de Fourier (DFT), cada coeficiente es localizado en tiempo y frecuencia [22]. Esto, con el fin de eliminar las altas frecuencias que están afectando los picos de la señal sísmica. El algoritmo STA/LTA [21] se utiliza para representar la relación señal a ruido (SNR) a fin de definir el pico en una ventana corta (STA) o en una larga (LTA) superior a un umbral. El STA/LTA es el algoritmo más utilizado en el campo de sismología. Por último, un servidor de llamadas de clientes NTP situado en CC, para conseguir la sincronización de todos los nodos del sistema y precisión temporal en el muestreo, y, con el fin de manejar la privacidad de los datos del usuario (id, ubicación), se utiliza un mecanismo de seguridad

con clave TLS para el servidor. Por medio del modelo M2M de suscripción/publicación MQTT, trae la oportunidad de seleccionar el que los SI requiere una AT mostró en la Fig. 6. MQTT también nos permite proporcionar seguridad con SSL, calidad de servicio (QoS) y autenticación con prefijos. Cuando el SP recibe un mensaje MQTT del IS, entiende que ha sucedido un evento sísmico y se notifica inmediatamente al usuario con una alarma.

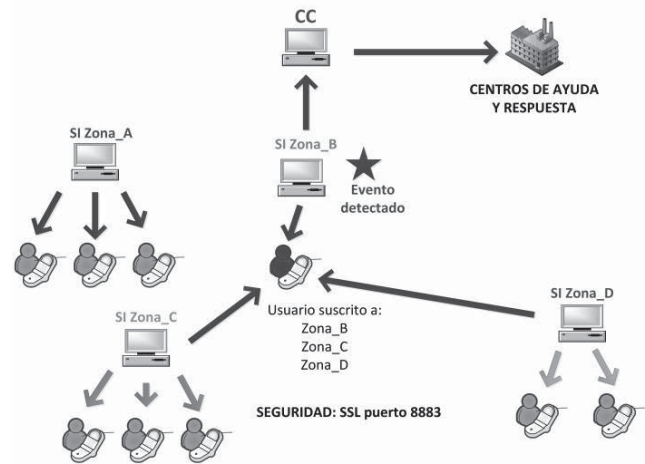


Fig. 4. Notificaciones MQTT.

B. Aplicación Servidor Intermedio

Para la segunda capa, el software core ha sido desarrollado en Java y en la actualidad se puede ejecutar en plataformas Windows o UNIX de 64 bits. Su característica principal es el abrumador número de procesos que debe realizar para alcanzar una respuesta precisa y rápida. El SI siempre está escuchando si los SP clientes enviaron muestras y siguiendo el diagrama de flujo en la Fig. 5.

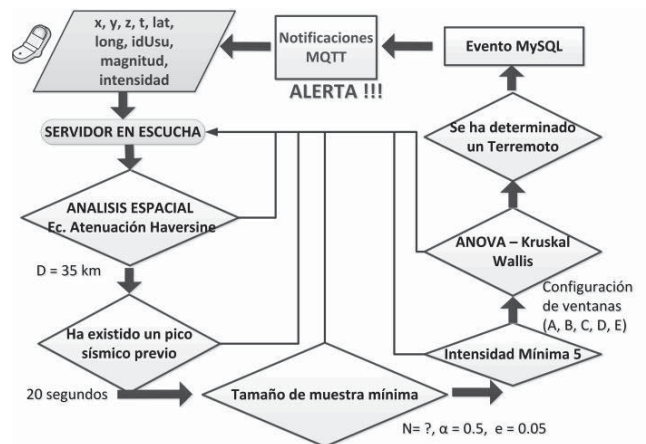


Fig. 5. Diagrama de flujo SI.

Se sincroniza el reloj de cada uno de los nodos con el reloj de CC por medio de un servidor NTP, antes de cada muestra ingrese a la base de datos MySQL debido a la condición de tiempo real. Luego, para determinar la existencia de un terremoto, el servidor lleva a cabo algunas pruebas y

validaciones con el fin de reducir los falsos positivos que disminuyen la fiabilidad del sistema:

-- El análisis espacial es obligatorio. La ecuación 1 define las ecuaciones de atenuación a utilizar. Muestran como la intensidad de las ondas sísmicas disminuye a medida que aumenta la distancia, por lo que si hubo un evento sísmico en la zona "A", los SP de dicha zona medirían una aceleración mayor que los acelerógrafos específicos en la zona "B". Por lo tanto, un SI debe analizar sólo las muestras que corresponden a una única ubicación o, en otras palabras, las muestras correlacionadas espacialmente. Usando las ecuaciones de atenuación forzamos a un SI analizar sólo las muestras que están dentro de su área de distribución. La intensidad del terremoto varía en relación con estas ecuaciones, y esta a su vez depende de los tipos de suelo, velocidades y otros parámetros; por lo que cada zona geográfica tiene sus propias ecuaciones. Trabajamos con una de las ecuaciones de atenuación de Ecuador [22] de la siguiente manera:

$$\log(A_{gals}) = 1.2474 + 0.3735 * M - 0.4383 * \ln(D + 0) \quad (1)$$

$$A_{gals} = 1.2474 + 0.3735 * 5.5 - 0.4383 * \ln(D + 10) \quad (2)$$

$$A_{max} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - g = \sqrt{19.6^2 + 19.6^2 + 19.6^2} - 9.8 = 24.14 \quad (3)$$

Donde A_{gals} es la aceleración en $[cm/s^2]$, M y D la distancia al hipocentro. Hemos establecido una magnitud de M en 5,5 ya que de acuerdo con la Intensidad de Mercalli Modificada (IMM) de un terremoto, 5 se considera como moderada y antes de este valor, no se debería emitir una alerta. Hemos utilizado la máxima aceleración SP en los tres ejes para la ecuación 3, para tener un balance entre el número de muestras y la eficacia. Si D es demasiado pequeño podría ser el caso de que se agoten las muestras y si es demasiado grande, las muestras no están correlacionadas obteniendo la máxima distancia al hipocentro igual a 35 kilómetros, que corresponde a la distancia al epicentro [13]. Las muestras que tienen una latitud y longitud que no se ajusten a la función Haversine [19] entre su ubicación y la ubicación del servidor guardada en MySQL, se descartan y serán consideradas por otro SI más cercano.

-- La prueba de mínimo muestreo, indica la cantidad de SPs (SPs activos) de todos los registrados, son suficientes para generalizar la población con un porcentaje de fiabilidad y un margen de error como se define en la ecuación. 4:

$$\eta = \frac{N * Z_{\frac{\alpha}{2}}^2 * \sigma^2}{(N-1) * e^2 * N * Z_{\frac{\alpha}{2}}^2 * \sigma^2} \quad (4)$$

Donde N = población total, n = proporción de la población - Número de usuarios que ha enviado un pico, e = error permitido sísmica (1%, 0,05%), Z = nivel de confianza (0,95 = 1,96 sigma/error).

Tanto los SPs como el SI, hacen validaciones para determinar cuáles SPs están vivos (activos) y cuáles no. En primer lugar, los SPs envían mensajes y están constantemente monitoreando la conectividad dentro de RSP para reconexiones; y en segundo lugar el SI valida el último tiempo de conexión y después de un determinado período de tiempo

(30 minutos) cambia el estado del SP en la base de datos a inactivo. Estas validaciones son importantes porque hemos considerado una población finita que puede cambiar con el tiempo, teniendo SPs sin datos de su ubicación, conectividad de red, que tienen una batería muerta, etc.

-- Kruskal Wallis o la prueba H [16], es una prueba estadística no paramétrica para sondear si un conjunto de datos proceden de la misma población (correlacionados) o no (no correlacionada), teniendo en cuenta que dos grupos son diferentes cuando la variabilidad entre los grupos es mayor que la variación dentro del grupo.

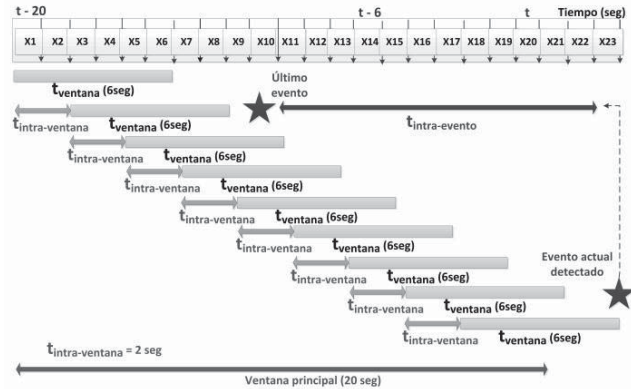


Fig. 6. Algoritmo de ventana deslizante.

Para utilizar Kruskal Wallis se desarrolló un algoritmo de ventanas deslizantes periódico que se muestra en la Fig. 6. El proceso se repite cada 2 segundos recogiendo la intensidad de todas las muestras almacenadas en la base de datos en una ventana de 6 segundos para procesarlos. Cada 20 segundos que corresponden a una ventana padre, toma de nuevo las intensidades para probar la correlación utilizando Kruskal Wallis y, finalmente, trata de eliminar el riesgo de notificar al usuario el mismo evento o sus réplicas mediante la validación de que el tiempo entre el último y el actual evento, ha sido al menos 20 minutos.

Una vez que se detecta un terremoto, se informa al usuario de inmediato, otorgándole un valioso tiempo e información para tomar mejores decisiones y ponerse a buen resguardo. El SI utiliza un servidor MQTT llamado "mosquito" [17], para publicar los SPs que se han suscrito cada vez que se detecta un evento.

C. Centro de Control

El CC se considera el nodo central de la RSP, debe estar situado en una de las sedes de la agencia de gestión de emergencias, y actúa como un puesto de mando y control, entregando a los directores y comandantes de la gestión de emergencias, la información necesaria para conformar una conciencia situacional real y precisa del entorno de operaciones, que derive en decisiones y acciones ágiles y efectivas [23].

Hemos extendido nuestra propuesta desde una gestión pre-evento a una gestión post-evento, donde en primer lugar, cada SP ayuda a CC a obtener una conciencia situacional global y realista, posterior a la ocurrencia de un terremoto y durante la

emergencia, mediante el envío de la información complementaria como comentarios, fotos, vídeos, etc.; y la segunda, ayudando a los usuarios a tomar mejores decisiones, proporcionando información sobre los centros de ayuda más cercanos, rutas más seguras y rápidas, conformando una RSP confiable, ágil y de bajo costo.

IV. RESULTADOS

Para las pruebas, se contó con los siguientes dispositivos que se muestran en la Tabla I:

TABLA I
DISPOSITIVOS USADOS POR CAPAS

Capa	Tipo	Num.	Dispositivo	S.O. (Versión)
capa 1	Sensor	2	Samsung Galaxy Ace	Android (2.3.6)
capa 1	Sensor	2	Samsung Galaxy S3	Android (4.1.2)
capa 1	Sensor	3	HTC Desire	Android ()
capa 1	Sensor	2	LG Optimus P700 L7	Android (4.0.3)
capa 1	Sensor	1	LG Optimus P470 L5	Android (2.2.0)
capa 2	SI	1	I5 Dell Inspiron Core	Windows 7
capa 3	CC	1	HP Pro i5 Core libro	Windows 7

En primer lugar, la aplicación SP fue probada simulando un evento sísmico golpeando una mesa de demostración donde el SP estaba ubicado [25]. Los resultados se obtuvieron a partir de esta prueba (los números obtenidos son un promedio de todas las medidas obtenidas de los SPs), además de que las características impredecibles de un terremoto, han hecho imposible probarlo en un entorno completamente real.

Aunque los SPs no tienen la misma calidad de sensorización que los acelerómetros específicos, la aplicación puede recoger movimientos tan pequeños como la vibración del equipo por recibir un SMS (obviamente, estos movimientos no se envían a SI), verificando así, que los acelerómetros MEMS tienen la calidad suficiente para esta investigación.

Un punto relevante del experimento, fue la medición de la cantidad de batería consumida por la aplicación *e-quake*, puesto que los usuarios podrían dejar de utilizar la aplicación por este motivo. En la actualidad, la aplicación consume un máximo de 10% de la energía de la batería (42 horas sin carga), que comparado con otras aplicaciones y con el hecho de que la aplicación puede marcar la diferencia entre la vida y la muerte del usuario, no es excesivo. Por ejemplo, la app de WhatsApp [27], consume un 13% de batería al día en promedio. Este porcentaje se podría reducir de manera significativa si se modifica la frecuencia de muestreo, tiempo de reconexión o el número de mensajes. Además, la mayoría de aplicaciones que monitorean el consumo de batería en un SP, a menudo si detectan un nivel bajo de batería (>10%), pueden hacer que se detenga la sensorización (SP como acelerógrafo) y sólo mantener corriendo el protocolo MQTT para alertar al usuario de ser el caso; es decir, se podría llegar a perder un sensor, pero podríamos salvar una vida.

Se necesitaron diez voluntarios para llevar un SP en el desarrollo de sus actividades cotidianas como caminar, sentarse, o incluso correr, con el fin de probar si nuestra

aplicación puede distinguir entre un pico sísmico a estos movimientos habituales mediante el algoritmo STA/LTA. Aquí, la aplicación tuvo un desempeño bastante aceptable con un 85,1% de exactitud, o en otras palabras, quince de cada cien veces que se envió un mensaje de alerta al SI en realidad no era un evento sísmico. Este porcentaje de error será reducido por el respectivo SI, donde serán procesadas y validadas todas las muestras, aumentando significativamente la precisión y la eficiencia de todo el sistema.

El objetivo principal de este trabajo es proporcionar tiempo adicional a los usuarios finales para una mejor toma de decisiones y ponerse a buen resguardo en el caso de un evento sísmico. Se pudo comprobar que la arquitectura cumple con los requisitos de tiempo real requeridos: el tiempo que el SI se toma para procesar alrededor de dos mil muestras (dos mil SPs activos dentro de su rango de cobertura) mediante una prueba-programa desarrollado en Java para poner a prueba su procesamiento (Fórmula Haversine, Kruskal Wallis, algoritmo de ventana deslizante) fue de 1,2 segundos. Por otra parte, un retraso de menos de un segundo entre que el SI valida un evento sísmico pico y se notifica a los usuarios. Estos resultados en la comunicación son un gran progreso, incluso fuera de los entornos WiFi como 3G o 4G. Esto es debido al protocolo de notificación analizado, MQTT, que en la actualidad se utiliza ampliamente en la investigación y los proyectos relacionados con el Internet de las cosas (IoT).

V. CONCLUSIONES

La arquitectura de tres capas presentada y desarrollada satisface los objetivos de un SATT en términos de tiempo, escalabilidad, seguridad y adaptabilidad, y su eficiencia y precisión aumentará proporcionalmente al número de usuarios que posea el sistema, gracias al modelo de fusión de datos utilizado. Para la capa 1 (nivel 0 del modelo JDL), se desarrolló una aplicación SP tomando en cuenta el consumo de batería y reconexiones de red, junto con un mecanismo de notificación MQTT que cumple con los requerimientos de tiempo real impuestos y con un mecanismo de detección sísmica que permite a los SPs comportarse como acelerómetros que pueden diferenciar entre los movimientos habituales del usuario (caminar, correr, hablar, etc.) y un evento sísmico real de gran magnitud. Todos los SPs reportan a un SI, el cual procesa y valida las muestras recibidas dentro de su rango de cobertura. Este servidor que corresponde a la capa 2 de la arquitectura (nivel-1 en el modelo JDL), fue desarrollado en Java y Matlab, recolecta las muestras provenientes de la red inalámbrica de sensores conformada por los SPs presentes en cada zona geográfica (que tengan instalada la aplicación *e-quake*), e identifica los eventos sísmicos de gran magnitud, notificando inmediatamente al usuario de ser el caso, y otorgándole un tiempo que podría ayudar a salvar una o más vidas. En la tercera capa (nivel-2 y leve-3 en el modelo JDL), el CC, conoce todo el entorno del desastre gracias a la información proporcionada por los SIs, y es aquí donde se tomarán acciones y decisiones con el fin de gestionar de la mejor manera posible la emergencia.

Una parte fundamental que ha permitido la obtención de estos resultados, ha sido la utilización del modelo JDL. El modelo JDL es un modelo de fusión de datos que ha permitido diseñar una arquitectura confiable, eficaz y escalable en cada uno de sus niveles, posibilitando la corrección de errores. Podemos concluir que la arquitectura satisface los requerimientos de un SAT, puesto que entrega un tiempo que, aunque puede estar sólo en el orden de los segundos (depende de la duración del sismo) o minutos, es vital y puede salvar cientos o tal vez miles de vidas.

Por último, los resultados justifican la arquitectura y los métodos utilizados que podrían implementarse en un corto período de tiempo, con bajos recursos monetarios, y con una eficiencia directamente relacionada con el número de usuarios del sistema, que esperamos sea cada vez mayor. Por lo tanto, hemos obtenido una arquitectura ágil y de bajo costo que puede ser implementada en cualquier lugar, especialmente en zonas geográficas con un alto riesgo sísmico permanente como el Ecuador.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALLEN, R. Seconds before the Big One: Progress in Earthquake Alarms. Scientific American 2011. Permanent Address: <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=tsunami-seconds-before-the-big-one>. 2011.
- [2] BEAUVAL, C., YEPES, H., BAKUN, W., EGRED, J., ALVARADO, A., SINGAUCHO, J.C. Historical Earthquakes in the Sierra de Ecuador (1587 – 1996). Geophysical Journal International, 181 (3), 2010:613-1633.
- [3] Bimal, G., Khushbu, S; - Analysis of The Emerging Android Market; Master Thesis – San José State University - Department Of General Engineering, 2010.
- [4] Bormann, P., Engdahl, B., & Kind, R. Seismic Wave Propagation and Earth models. In P. Bormann (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2). 2012: 1-105.
- [5] Chandy, R., Rita A. and Qistein Skjellu. “QuakeCast: Distributed Seismic Early Warning”. Caltech Undergraduate Research Journal Winter 2011. 2011
- [6] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012–2017, Cisco Systems, Inc, Available at: http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.pdf. 2013.
- [7] Cochran, W.G. Sampling Techniques, 2nd Edition, New York: John Wiley and Sons, Inc. 1963.
- [8] Developer Android. Available at: <http://developer.android.com/about/dashboards/index.html>. 2016
- [9] Ervasti, M., Dashti, S., Reilly, J., Bray, J.D., Bayen, A., Glaser, S; (2011)- IShake: Mobile Phones as Seismic Sensors – User Study Findings; Proceedings of the 10th international Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, NUM 11, 2011: 43-52.
- [10] Faulkner, M., Olson, M., Chandy, R., Krause, J., Chandy, M., Krause, A, The next big one: Detecting earthquakes and other rare events from community-based sensors. ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks IPSN’11, 10. 2011.
- [11] Google Cloud Platform- official Site. Available at <http://cloud.google.com/>.2016
- [12] Hunkeler, U. Truonh H.L and Standford-Clark A, MQTT-S A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks. Communication Systems Software and Middleware and Workshops. 978-1-4244-1796-4. 791-798. 2008.
- [13] Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. Informe sísmico para el Ecuador, Available: http://www.igepn.edu.ec/images/collector/collection/informes-de-actividad-sismica/informe_ssmico_para_el_ao_2011_final.pdf. 2011.
- [14] Izu Belloso, Miguel José. “De la protección civil a la gestión de emergencias.” Revista Aragonesa de Administración Pública N.35. Zaragoza, 2009.
- [15] Kontogiannis, T. and Kossiavelou, Z; “Stress and team performance: principles and challenges for intelligent decision aids”. Safety Science, Vol.33, 1999: 103 -106.
- [16] Kruskal, W. and Wallis, W.A, Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. Journal of the American Statistical Association. Vol. 3. 2004.
- [17] Mosquitto MQTT Broker – official site. Available at: <http://mosquitto.org/>.2016
- [18] Panagiotis, P. and Vassilis, T. On Transport Layer Mechanisms for Real-Time QoS; Journal of Mobile Multimedia, Vol. 1, no. 4; 343 – 363. 2006.
- [19] Robusto, C. The cosine-Haversine formula. The American mathematical Monthly, 1957:38-40.
- [20] Secretaría Técnica de Gestión de Riesgos Ecuador. “Guía para la incorporación de la variable de riesgo en la Gestión integral de nuevos proyectos de infraestructura”, 2012: 99-108. January 2013. <http://www.gestionderiesgos.gob.ec/>
- [21] Sharma, B., Klumar, A., Murthy, VM. Evaluation of Seismic Events Detection Algorithms, Journal Geological Society of India, Vol.75, 533-538. 2010.
- [22] Sheng, X., Zhang, Y., Pham, D., Lambaré G. Antileakage Fourier transform for seismic data regulation, Geophysics, Vol. 70, no. 4, 87-95. 2005.
- [23] Servicio Nacional de Sismología y Vulcanología oficial site: <http://www.igepn.edu.ec/>. 2016.
- [24] Steinberg, A. Bowman, C. and White, F. “Revisions to the JDL Data Fusion Model; Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications”. Vol. III. 430, 1999.
- [25] Suzuki, M., Saruwatari, S., Kurata, N., & Morikawa, H. Demo Abstract: A High-Density Earthquake Monitoring System Using Wireless Sensor Networks, Proceedings of the 5th international conference on embedded networked sensor systems, 2007:373-374.
- [26] UNISDR, Los Sistemas de Alerta Temprana. Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres. 2006
- [27] WhatsApp official site. <http://www.whatsapp.com/>. 2016.



Oscar M. Zambrano¹, obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, y de Magister en Gerencia Empresarial en la Escuela Politécnica Nacional en el 2001 y 2009 respectivamente. Actualmente es Aspirante a Ph.D en la Universidad Politécnica de Valencia, en la Escuela de Telecomunicaciones, como parte del grupo de investigación de Sistemas de Tiempo Real Distribuidos. Docente Universitario con 10 años de experiencia y más de 15 años de experiencia en el sector de las TIC y las Telecomunicaciones.



Mauel Esteve Domingo², recibió su M.Sc in Ingeniería de la Computación y su Ph.D en Ingeniería de Telecomunicaciones (Dr. Ing) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) en 1986 y 1994 respectivamente. Es profesor a tiempo completo de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones de la UPV, liderando el grupo de investigación de Sistemas en Tiempo Real Distribuidos. Prof. Manuel Esteve tiene más de 20 años de experiencia en áreas de investigación como Networking. Actualmente, maneja varios proyectos R&D a nivel regional, nacional e internacional. Ha colaborado en proyectos gubernamentales, de defensa y EU- FP7 actuando como presidente. Es autor y co-autor de más de 100 artículos de investigación.



Carlos E. Palau³, recibió sus grados de M.Sc y Ph.D (Dr.Ing), ambos en telecomunicaciones, de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), en 1993 y 1997 respectivamente. Actualmente es profesor en la Escuela Técnica Superior de ingenieros en Telecomunicación en la UPV. Tiene más de 18 años de experiencia en el área de investigación ICT – Networking. Ha colaborado exhaustivamente en R&D de streaming Multimedia, seguridad, redes y comunicaciones inalámbricas para agencias gubernamentales y Comisiones Europeas. Ha sido investigador UPVLC en el proyecto FASYS. Es autor y co-autor de más de 120 artículos y miembro de varias conferencias IEEE, ACM e IFIP.



Ana M. Zambrano⁴, obtuvo el grado de Ingeniera en Electrónica y Redes de Información en el año 2010, en la Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador. En el 2011 se hizo acreedora de una beca de Ecuador para cursar estudios doctorales en la Universidad Politécnica de Valencia donde obtuvo en el 2015 el grado de Phd. En Telecomunicaciones. Actualmente trabaja en la Escuela Politécnica Nacional donde sus investigaciones van dirigidas hacia aplicaciones en tiempo real, sistemas distribuidos e Internet de las Cosas conjunto con Smartcities.