

Uso de Sensores Satelitales GPS para un Sistema de Monitoreo Geotécnico en Tranque de Relave

1. Introducción.

Luego del desastre en el Tranque de Relave en la Minera SAMARCO en Mina Gerais Brasil, es que se ha vuelto una constante preocupación y debate sus instalaciones, operaciones y eventual cercanía con algunos poblados. La discusión en torno a estas estructuras contenedoras de relaves mineros ha tendido a incrementarse en el tiempo, por un lado debido a la existencia de depósitos abandonados, de los cuales nadie se hace responsable y a la creciente falta de terrenos donde dejar estos residuos, cuyo volumen va en aumento por la menor ley del mineral.



Falla Estructural – Tranque Minera SAMARCO - Mina Gerais

Sin embargo, y a pesar de que estas discusiones están siendo desarrolladas en términos operativos, se ha dejado de lado un aspecto muy importante que dice relación con el seguimiento estructural o Monitoreo del tranque. A esto se debe tener presente que en el último tiempo estas estructuras se han visto expuestas a inclemencias climáticas producto de fuertes eventos de lluvia, aluviones y eventos de terremotos que han afectado principalmente al norte de nuestro país. Por lo anterior, es que las autoridades competentes deberán fiscalizar el cumplimiento de las diversas exigencias establecidas en el marco legal vigente establecido en “el Decreto Supremo N°248 del Ministerio de Minería, el cual indica que debe presentarse al Sernageomin un proyecto de depósitos de relaves para su aprobación, junto con un informe trimestral del manejo del depósito (Formulario E-700) a lo largo de su operación”.

En este sentido y de acuerdo a las opiniones de expertos, se sugiere que en su etapa de construcción se realicen operaciones de controles constructivos, en donde, uno de los principales es la granulometría de la arena de relave con la que se construye el muro contenedor. Además se recomienda el control de la geometría de edificación y la compactación del muro, estableciendo procedimientos auditables para controles operacionales, constantes y periódicos.

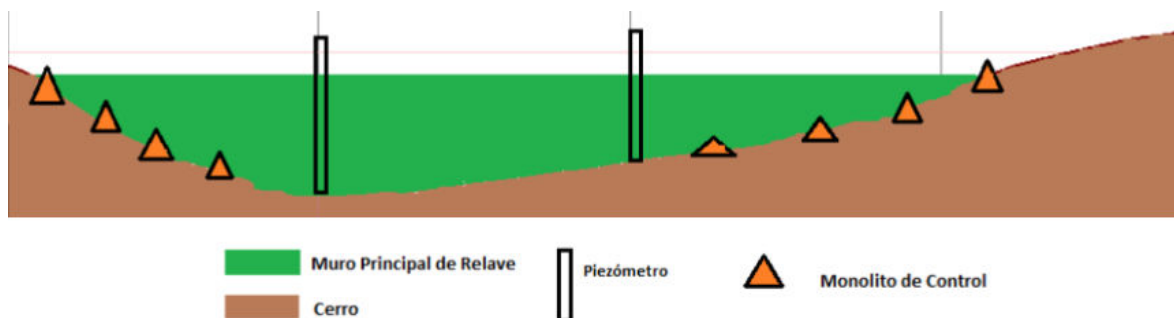
2. Instrumentación en tranques de relaves.

Con objeto de tener datos que describan el comportamiento estructural de las paredes contenedoras es que se debe disponer de modelos de solución para la implementación de un sistema de instrumentación geotécnica que permita registrar el comportamiento ante un evento fluvial o de características sísmicas, tales como: piezómetros Casagrande y piezómetros eléctricos, los cuales miden el nivel freático de las paredes con objeto monitorear el correcto funcionamiento de los drenes. Los acelerómetros que permiten evaluar las aceleraciones a la cuales se somete el muro del tranque ante un evento sísmico. Junto con ello, también se recomienda efectuar mediciones de desplazamiento espacial con el propósito de detectar deformaciones horizontales y verticales.

Por lo anterior, es que un modelo de solución Geotécnico Global para un Tranque de Relave debiera considerar las siguientes variables a medir:

- Densidad in-situ en el muro de arenas y densidad relativa.
- Nivel freático.
- Aceleraciones del suelo en tranque.
- Deformaciones Verticales y Horizontales.
- Presión de poros.
- Granulometría de las arenas de relave.

A partir de este planteamiento podemos establecer un esquema general de la instrumentación geotécnica a implementarse en un modelo de instrumentación.



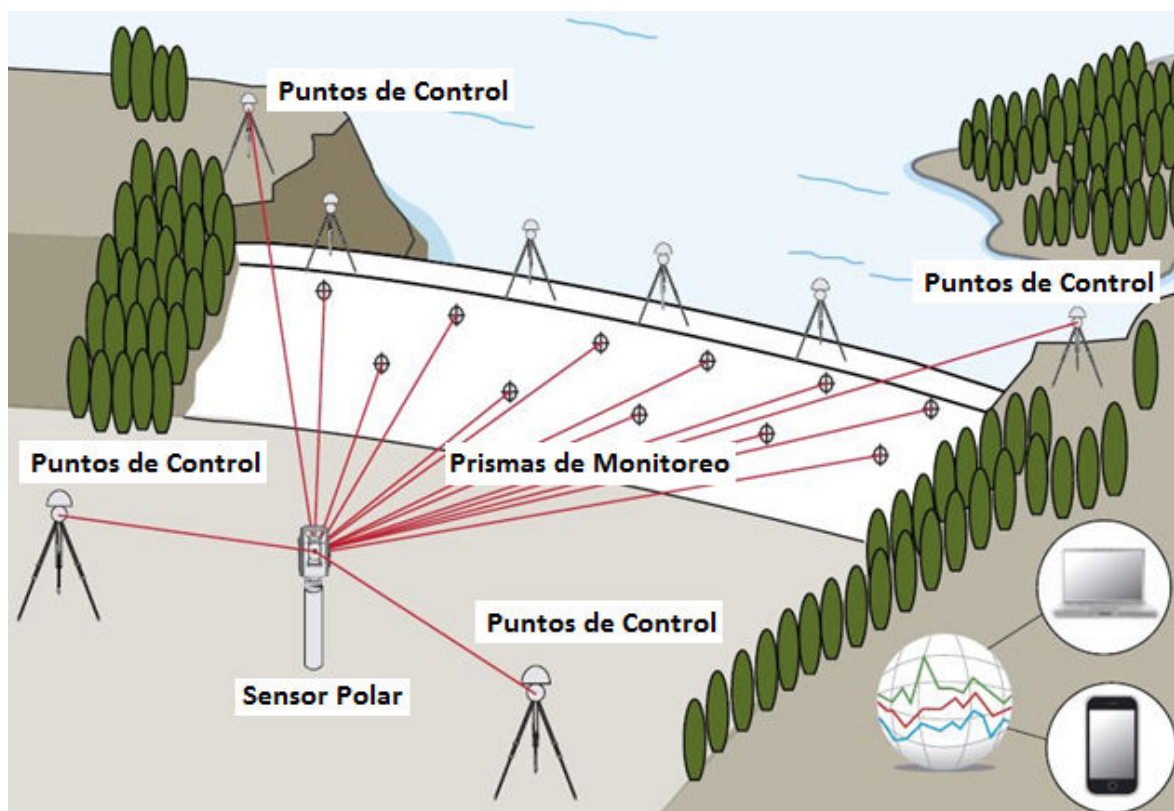
Esquema General para Instrumentación de un Tranque de Relaves

A partir del esquema planteado, este documento tiene por objeto describir y argumentar a modo de ingeniería conceptual una propuesta instrumental y plataforma de software para el proyecto de instrumentación geotécnica basado en tecnología satelital GNSS para la medición de desplazamientos verticales y horizontales.

3. Descripción conceptual de sensores GNSS para instrumentación de monitoreo.

3.1 Justificación del uso de Sensores Satelitales GNSS.

El modelo de solución clásico para un sistema de monitoreo espacial de una pared contenedora utiliza un sensor polar como elemento de medición para el registro de los eventuales desplazamientos de la pared contenedora. A continuación se muestra un esquema general del modelo de solución basado en sensores polares implementados con Estaciones Totales.



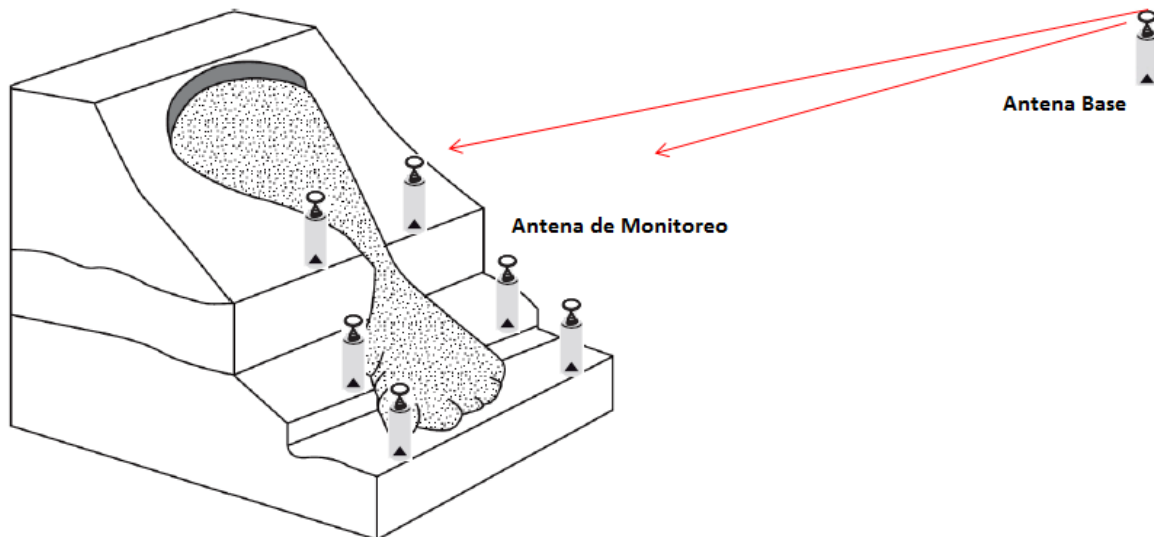
Esquema General para Instrumentación con Sensor Polar

A partir de este esquema y de las condiciones que se establecen en las zonas territoriales de un tranque de relave, se pueden indicar los siguientes aspectos:

- Se requiere la instalación de elementos reflectores en las zonas de interés.
- Se precisa visión directa a los reflectores para la medición de distancia radial.
- Debido al uso de ondas electromagnéticas para la determinación del posicionamiento espacial, es que las mediciones se verán afectadas por condiciones atmosféricas tales como: Temperatura, Humedad Relativa, Polvo, Niebla, etc., afectando con ello la disponibilidad de medida y su precisión.
- Para la obtención de precisiones de menos de un centímetro, se requiere que el sensor polar esté instalado en frente de la pared contenedora y una distancia de menos de 700 metros.
- Se requieren puntos de control para asegurar la estabilidad del monolito de instalación para el sensor polar.

A partir de estos requerimientos y de las condiciones territoriales en donde se implementa una estructura de tranque de relave se puede observar que algunas son muy difíciles de establecer por motivos de la geografía existente en el área y de disponibilidad de los espacios necesarios, por tanto muchas de estas condiciones se transforman en desventajas para este tipo de sensores. Por estas razones, es que el uso de Sensores Satelitales como elemento sensor cobra vital relevancia para el estudio de estabilidad estructural.

Un esquema general de un sistema de monitoreo con sensores satelitales GNSS sería como sigue:



Esquema General para Instrumentación con Sensor Satelital

A partir de este esquema con sensores satelitales y de las condiciones que se establecen en las zonas de un tranque de relave, se pueden indicar los siguientes aspectos:

- Se requiere la instalación de elementos de antena en las zonas de interés.
- Se requiere disponibilidad de cielo abierto para el rastreo de satélites en las antenas GNSS instaladas en las zonas de interés.
- Se requiere un enlace de comunicaciones entre el punto base y los sitios de monitoreo.
- No se precisa visión directa entre el punto base y las antenas en los puntos de monitoreo.
- Debido al principio de funcionamiento el posicionamiento no se ve afectado por el comportamiento atmosférico, teniendo una buena disponibilidad y precisión.
- No se requiere ubicaciones geométricas especiales para las antenas respecto de la pared contenedora.
- El sistema puede establecer vectores de más de 10Km entre el punto base y los sitios de monitoreo.
- Se requiere solo punto de control para el cálculo de los vectores de monitoreo.

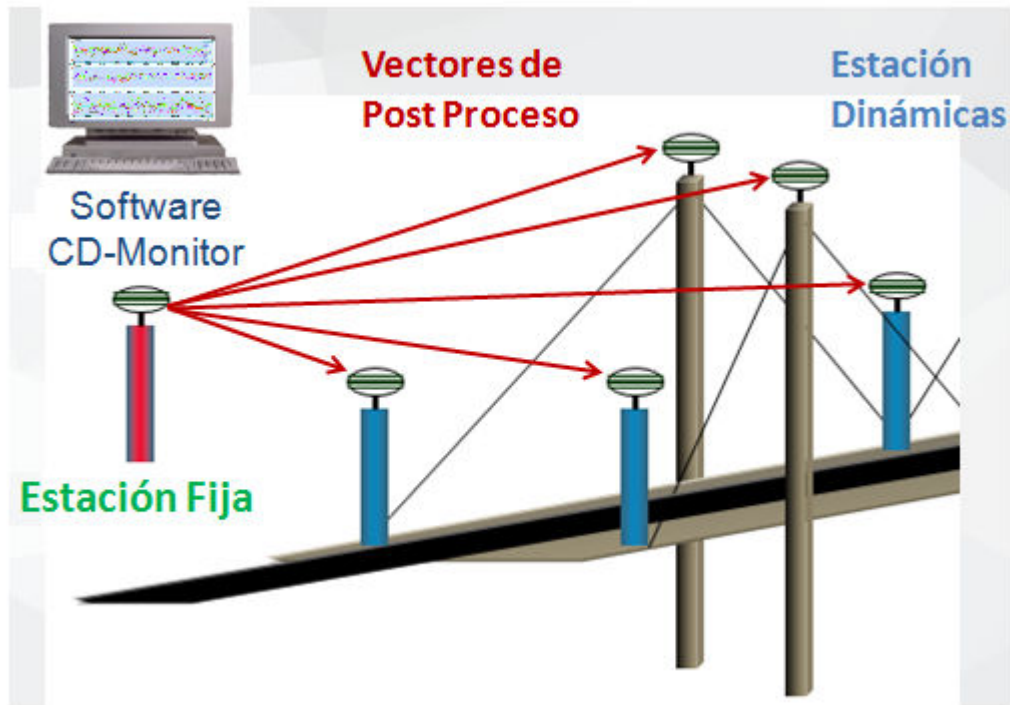
Podemos observar que las ventajas de un modelo de instrumentación satelital son muy superiores a las de un sistema polar, por lo que a continuación se revisan algunos aspectos generales de un modelo conceptual para la instrumentación satelital del tipo GNSS que se puede utilizar como solución para el diseño del sistema de medición de desplazamientos basados en sensores GPS.

3.2 Proposición conceptual para sistema de monitoreo con Sensores Satelitales GNSS.

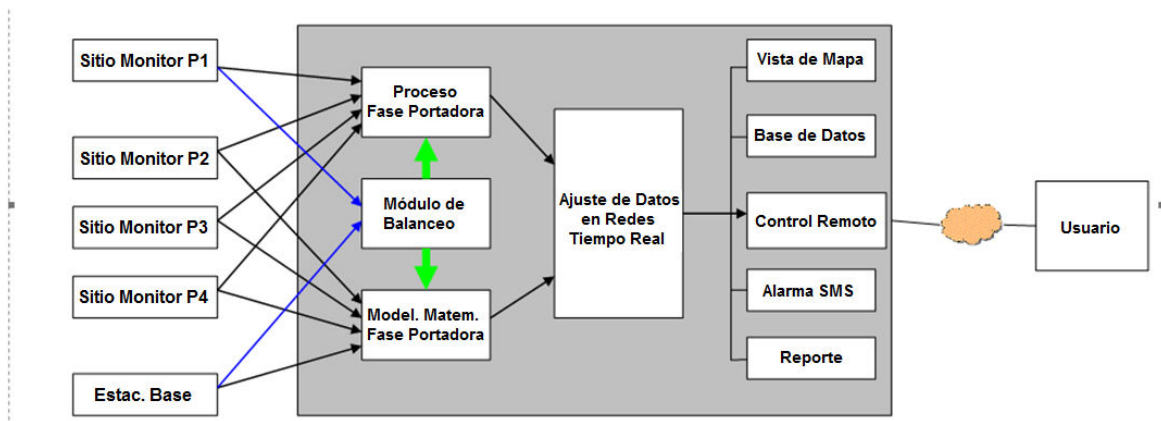
Este modelo de solución se basa principalmente en que las zonas con características inestables son monitoreados a través de puntos de medición con Sensores GPS, los cuales estarían localizados en aquellas zonas más representativas del comportamiento dinámico o del área geotécnica activa y que han sido designados para el estudio representativo del fenómeno.

Con este modelo conceptual el sistema establece las coordenadas de los sitios (puntos) bajo condición de monitoreo mediante procesos de cálculos vectoriales GPS en post proceso o en tiempo real con la plataforma de procesamiento GNSS CD-Monitor de ComNav Technologies. Luego, las coordenadas calculadas pueden ser utilizadas por herramientas de análisis de desplazamiento para los sitios (paredes) en estudio, permitiendo configurar vectores de monitoreo como lecturas de sensores que posteriormente pueden ser configurados con valores de umbral de manera que puedan activar sistemas de alerta por mensajería electrónica o accionamiento electromecánico activado por Web Relé.

En la siguiente figura se muestra un diagrama general de un sistema de monitoreo de infraestructura, en donde, se puede identificar los componentes principales de un modelo de solución basado en la tecnología GNSS.

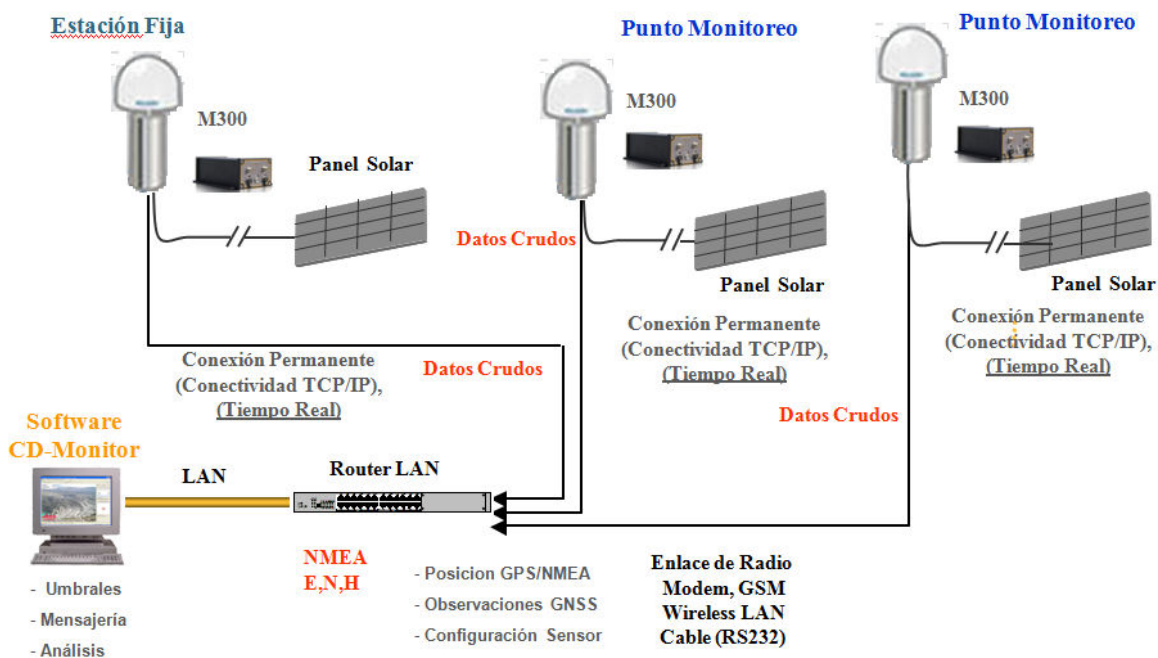


De acuerdo a lo anterior, se establece que cada punto de monitoreo (Estación Dinámica/Sensor GPS) estaría enviando trenes de datos con las observaciones GNSS rastreadas, las cuales serían enviadas a una Estación de Trabajo con la herramienta de procesamiento CD-Monitor ubicado en algún Centro de Control. Este centro de procesamiento realizaría las tareas de colección de datos GPS y procesamiento de los vectores GPS establecidos entre el sitio designado como Estación Fija y los sitios designados como Puntos de Monitoreo (Móviles) generando con ello una base de datos con la información espacial de cada sitio de monitoreo. En la siguiente figura se puede visualizar un esquema con el flujo de información que permite configurar la integración de los Sensores como parte de un centro de procesamiento de vectores satelitales de monitoreo.



Luego, con algún tipo de herramienta de análisis de datos espaciales o planilla programada se efectuarían los cálculos de desplazamiento y comparaciones con eventuales umbrales de alerta, para efectos de la toma de decisiones en relación a la seguridad de las personas e infraestructura.

A continuación se despliega un diagrama con la arquitectura de una solución de monitoreo con Sensores GNSS en los sitios de monitoreo, en donde, se indican aquellos elementos que se utilizan como sistemas de soporte para el funcionamiento continuo y automático del sistema.



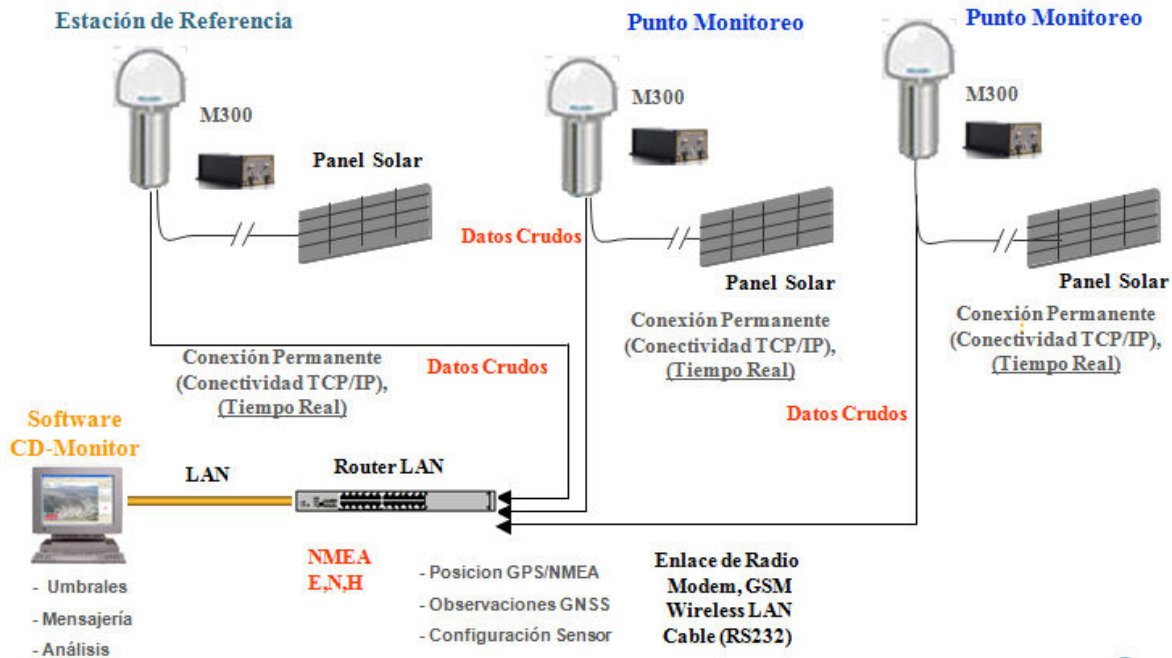
4. Análisis de resultados en casos reales.

Este planteamiento de modelo de solución tiene algunas aplicaciones activas en proyectos activos. A continuación se indicarán dos proyectos que se encuentran operando con sistemas de monitoreo con sensores GPS. En el primero se indica los resultados con una modalidad de operación en Tiempo Real RTK y el segundo de ellos opera en el modo de Post Proceso.



4.1 Solución con sensores GNSS operando en modo RTK.

La arquitectura usada en el modelo de solución con GNSS-RTK es el siguiente:

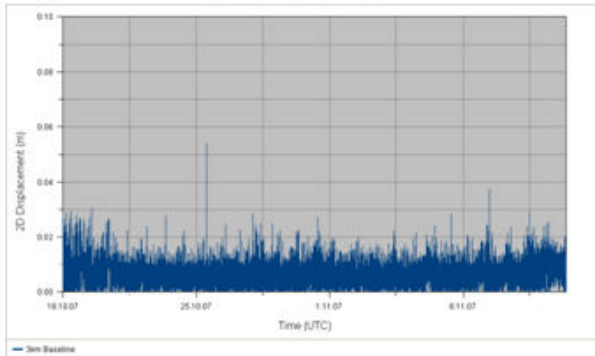


A continuación se muestra una imagen del mástil satelital GNSS para propósitos de monitoreo utilizado en esta arquitectura con GNSS-RTK.

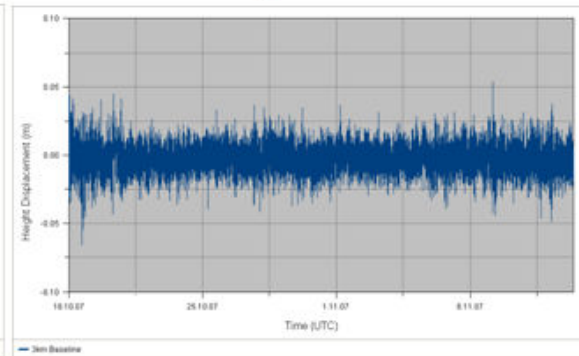


A continuación se muestra una muestra de los resultados obtenidos con este tipo de configuración. Las gráficas muestran la resultante del vector 2D y del vector altura.

2D Time Series



Height Time Series

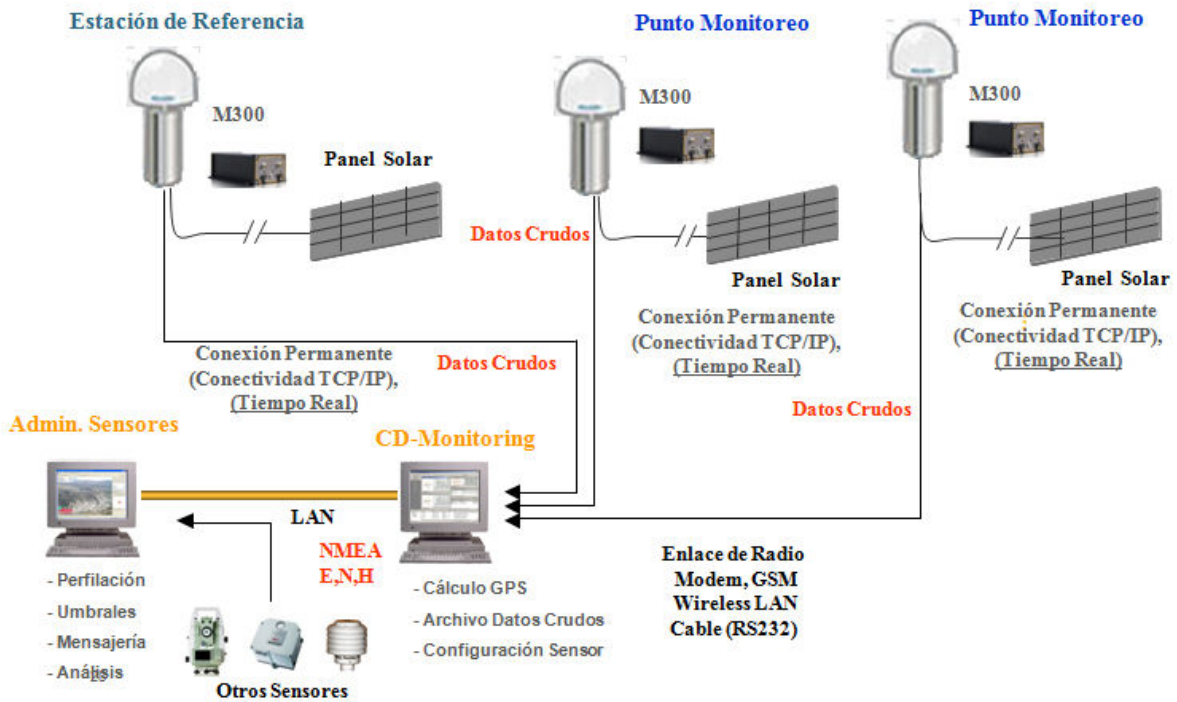


	2D Precision (95%)	Height Precision (95%)
Real Time	14.0mm	16.0mm

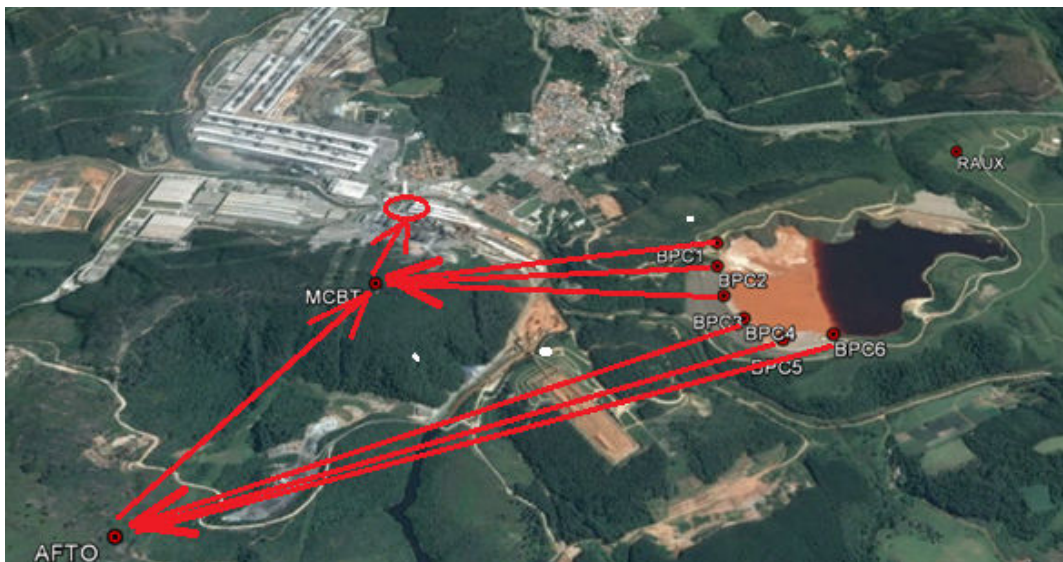
A partir de los resultados que muestran, se puede apreciar que las precisiones obtenidas en la modalidad RTK son de orden centimétrico, estableciendo una “sensibilidad de detección” que permitiría detectar desplazamientos con umbrales por sobre 2 centímetros. Por otro lado, y dado que la frecuencia de posicionamiento RTK puede llegar a los 50Hz, el sistema tendría una sensibilidad centimétrica con una alta característica de respuesta.

4.2 Solución con sensores GNSS operando en modo Post Proceso (PP).

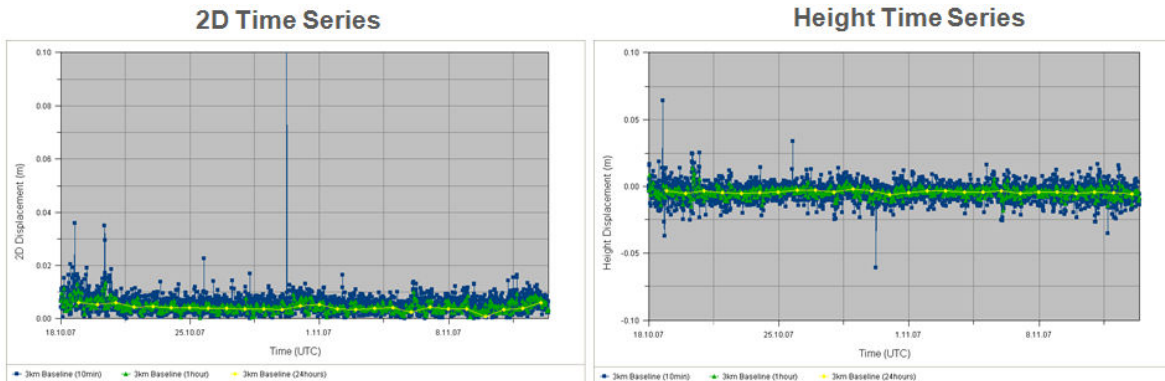
En este proyecto el modelo de solución utilizado se basó en una configuración de Red GNSS-PP, cuya arquitectura es la siguiente:



A continuación se muestra una vista aérea del proyecto que indica la distribución Geoespacial de los vectores GNSS utilizado en esta arquitectura con GNSS-PP.



A continuación se muestra una muestra de los resultados obtenidos con este tipo de configuración. Las gráficas muestran la resultante del vector 2D y del vector altura.



	2D Precision (95%)	Height Precision (95%)
10 minutes	7.2mm	12.4mm
1 hour	3.8mm	7.0mm
24 hours	2.2mm	1.8mm

A partir de los resultados obtenidos, se puede apreciar que las precisiones obtenidas en la modalidad Post Proceso dependen de la duración temporal de los paquetes de Post Proceso, pudiendo alcanzar precisiones milimétricas para paquetes por sobre una hora. No obstante, se debe tener presente que la frecuencia de posicionamiento no es alta si es que el usuario desea obtener precisiones subcentimétricas, lo cual hace que el sistema tenga una alta “sensibilidad de detección” a los desplazamientos pero con una baja característica de respuesta.

5. Conclusiones.

A partir de la descripción de los distintos modelos de solución con sensores GNSS en sus modalidades RTK y Post Proceso y por los resultados obtenidos en ambos modos de operación, podemos concluir lo siguiente:

- Los diagramas conceptuales expuestos han sido desarrollados de acuerdo a los requerimientos técnicos de orden general establecidos por las típicas necesidades de monitoreo estructural en especial para Tranques de Relave.
- La implementación de un modelo de solución con sensores satelitales debe considerar conceptos tales como: construcción de monolitos para las antenas GPS, alimentación para los sitios remotos, sistemas de enlace para los sitios con sensores GPS, etc., los cuales deberán considerar eventuales diseños acorde a las condiciones que presente la zona del proyecto.
- Los resultados demuestran que el sistema de monitoreo con sensores satelitales GPS, en sus modalidades de operación RTK y Post Proceso, pueden alcanzar los grados de sensibilidad que requieren las mediciones de desplazamiento de las paredes contenedoras en un Tranque de Relave.
- La modalidad de operación en RTK presenta un buen tiempo de respuesta para fenómenos dinámicos de alta frecuencia (<50Hz). Sin embargo, la “sensibilidad de detección” de desplazamiento espacial alcanza intervalos centimétricos ($\geq 2\text{cm}$).
- La modalidad de operación en Post Proceso posee una “sensibilidad de detección” de desplazamiento del orden de milímetros $\geq 3\text{mm}$, el cual dependerá del largo temporal de los paquetes de observación GNSS que sean procesados en la herramienta correspondiente. Sin embargo, y debido a la existencia de intervalos de registro para la conformación de paquetes de datos para post procesamiento cíclico, el tiempo de respuesta podría variar entre decenas de minutos hasta algunas horas, lo que radica un baja frecuencia como tiempo de respuesta.

Wernher Ibañez León
Director en Geo-tecnologías
GEOGlobalty