

Incertidumbre de datos geospaciales en la exploración petrolera

Uncertainty of geospatial data in oil exploration

Alexander Eduardo Inga Alva

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática. Lima, Perú.

Email alexander.inga@unmsm.edu.pe

Resumen

La presente investigación se ha enfocado en el análisis de la incertidumbre de datos geospaciales en la etapa inicial de la exploración petrolera. A través de la evaluación de índices de confiabilidad de distintos métodos de procesamiento de datos, se ha desarrollado un método que considera a la Información Geográfica Voluntaria (IGV) como una nueva fuente de datos y a la Geodatabase (GDB) como el repositorio donde se ha validado dicha información. Con la creación del artefacto "Uncertainty Sphere" que se ha basado en los algoritmos de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre y Medición (GUM) y las recomendaciones de ISO 19157:2013, Calidad de Datos Geográficos, se ha delimitado el Espacio de la Incertidumbre de los datos recolectados. La aplicación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) ha gestionado los datos de entrada (IGV), el procesamiento geoespacial (artefactos), el almacenamiento (GDB) y los productos informativos (mapas). Como caso de estudio, se ha evaluado la incertidumbre del geoposicionamiento del Pozo Capahuari Sur 3 de la empresa Frontera Energy y se han validado seis posibles ubicaciones usando GPSLogger y once con GPSMap60CSx. Estos resultados han permitido a la empresa considerar mejores escenarios para la perforación de futuros pozos exploratorios.

Palabras clave: Incertidumbre; Colaboración Abierta Distribuida; Sistema de Información Geográfica (SIG).

Abstract

The present investigation has focused on the analysis of the uncertainty of geospatial data in the initial stage of oil exploration. Through the evaluation of reliability indices of different data processing methods, a method has been developed that considers Voluntary Geographical Information (VGI) as a new data source and Geodatabase (GDB) as the repository where this information has been validated. With the creation of "Uncertainty Sphere" artifact that has been based on the algorithms of Guide for the Expression of Uncertainty and Measurement (GUM) and the recommendations of ISO 19157: 2013, Geographic Data Quality, Uncertainty Space has been delimited from data collected. The application of a Geographic Information System (GIS) has managed input data (IGV), geospatial processing (artifacts), storage (GDB) and information products (maps). As a case of study, geopositioning uncertainty of Capahuari Sur 3 well of Frontera Energy company has been evaluated and six locations have been validated with GPSLogger and eleven with GPSMap60CSx. These results have allowed the company to consider better scenarios for the drilling of future exploratory wells.

Keywords: Uncertainty; Crowdsourcing; Geographic Information System (GIS).

Correspondencia:

Dirección: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática. Calle Germán Amézaga N° 375, Ciudad Lima 1.

Recibido 10/07/2018 - aceptado 28/08/2018

Citar como:

Inga A. Incertidumbre de Datos Geoespaciales en la Exploración Petrolera. Revista Peruana de Computación y Sistemas 2018 1(2):41-54. <http://dx.doi.org/10.15381/rpcs.v1i2.15378>

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Peruana de Computación y Sistemas de la Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución - No Comercia_Compartir Igual 4.0 Internacional. (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>) que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

1. Introducción

Desde tiempos inmemoriales el petróleo ha sido conocido y usado por los primeros hombres: “Y el valle de Sidim estaba lleno de pozos de **asfalto**.” (Génesis 14:10). En el imperio Incaico, se le conoció como “Copé” y se usaba como impermeabilizante de cántaros y vasijas de barro y, posteriormente, de las embarcaciones españolas. A nivel mundial, fue el coronel William Drake quien perforó el primer pozo con fines comerciales en 1859 en la localidad de Oil Creek, Titusville en el estado norteamericano de Pensylvania. En 1863, en el norte del Perú, en la zona llamada “La Brea” se perforó el primer pozo sudamericano [1]. A partir de entonces, una complicada actividad petrolera se ha desarrollado en nuestro país, como se registra en el año 1911 cuando la empresa London & Pacific Petroleum Co. por una mala praxis en sus valoraciones fue denunciada por malversación. Después de cuatro años, el gobierno peruano exigió reevaluar su propiedad y, aunque en 1921 se sometió a arbitraje por exigencias del Gobierno Británico, no se consideró “la tenencia del subsuelo”. En 1924, la Internacional Petroleum Company (IPC) adquirió los derechos sobre “La Brea” y casi por medio siglo los conflictos sobre el “Laudo de la Brea y Pariñas” se mantuvieron. En 1968, tras establecerse un mutuo acuerdo entre el Estado y la compañía privada, el negociador estatal denunció posteriormente la desaparición de la famosa “página 11” del acuerdo, lo que fue tomado como pretexto por el General Juan Velasco Alvarado para derrocar al gobierno constitucional del arquitecto Fernando Belaunde Terry, expropiando IPC y constituyendo a PETROPERÚ. Años más adelante, IPC fue compensado por el mismo gobierno militar que también recurriría, a pesar de su nacionalismo, a tecnologías y empresas extranjeras para la exploración petrolera en la selva amazónica a través de la creación del Modelo Peruano. Este modelo atrajo a dieciocho empresas que suscribieron contratos exploratorios, pero fue sólo la empresa Occidental Petroleum la que hizo un descubrimiento (en el Lote 1-A y 1-B) [2]. Con el tiempo, estos lotes se fusionaron formando el 1-AB que en 1985 pasó a la empresa Pluspetrol por 30 años (Perupetro, 2012 Memoria Anual). Hoy en día, ese lote ha sido renombrado como el Lote 192 siendo operado por la empresa Frontera Energy.

Con respecto a la disponibilidad de la información, a nivel internacional se ha manejado altos niveles de acceso a bases de datos de diferentes instituciones estatales. Sin embargo, la calidad que estas han presentado son uno de los grandes problemas, tal como lo indica el proyecto CYTED-IDEDES 606PI0294 sobre la “Evaluación y Potenciación de Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe” [3] donde se ha señalado que: “sería interesante evaluar en futuros estudios la calidad de la información, más allá de su propia disponibilidad”. A nivel nacional, según Resolución Ministerial 325-2007-PCM (Presidencia del Consejo de Ministros) se creó la Infraestructura de Datos Espaciales del Perú (IDEP) que es la suma de directrices, modelos, medios y técnicas es-

paciales que permiten el uso de información geoespacial del país con el propósito de generar bienestar, sostenibilidad y soporte gerencial. El sustento de esta arquitectura proviene de entidades públicas y privadas productoras de información geográfica, que brindan esta información vía internet con un mínimo de protocolos y especificaciones normalizadas (GEOIDEP, 2018). A pesar de esta iniciativa por parte del Estado para integrar a todos sus productores de datos geográficos, aún se tiene que la información, procedente de los bancos de datos espaciales, de distintas fuentes públicas por ser antiguas, en muchos casos, están mal georreferenciadas, no presentan georreferencia, carecen de reproyección o fueron creadas por terceros en sistemas propietarios. A esto se suma la falta de articulación institucional, la duplicidad de datos y la definición de las competencias institucionales (GEOIDEP, 2017) [4]. Considérese el siguiente ejemplo: ¿cuántos centros poblados existen actualmente en el Perú? Distintas instituciones estatales responden de forma diferente (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Bases de datos de centros poblados

Institución	Centros Poblados
INEI*	98011
MINEDU**	116495
ONPE***	69951
MINEM****	67508
Regiones	Datos Propios

*Instituto Nacional de Estadística e Informática, **Ministerio de Educación, ***Oficina Nacional de Procesos Electorales, **** Ministerio de Energía y Minas

Asimismo, datos más modernos adolecen de un control de calidad que valide su correcto posicionamiento y que se ajuste a las normativas actuales de la Red Geodésica Nacional, que según RJ N° 086-2011-IGN/OAJ/DGC, actualiza el marco de referencia de ITRF 1994 (época 1995-4) al ITRF 2000 (WGS84). De persistir esta problemática, la incertidumbre crecerá (entropía) al querer, por ejemplo, contrastar datos actuales con datos históricos no encontrándose un referente espacial confiable.

A pesar de que existe en la industria del petróleo documentación y mayor conciencia del uso de métodos probabilísticos, ¿por qué no ha habido una adopción más extendida?, ¿por qué la industria aparentemente todavía subestima la incertidumbre en sus distintas etapas? Parte de la respuesta a estas preguntas es que algunas empresas que han intentado cuantificar la incertidumbre y el análisis de decisión han experimentado la “Confusión inducida por la incertidumbre” como resultado de una aplicación incorrecta [5]. Otro factor de mayor relevancia ha sido: la falta de pruebas claras de que el incremento de la cuantificación de la incertidumbre y del análisis de decisiones, haya conducido a una mejora significativa en la toma de decisiones y en el rendimiento en la industria. Cabe resaltar, que la mayoría de los beneficios que se citan en los procesos de cuantificación

realmente son de naturaleza cualitativa, motivo por el cual muchas empresas son reacias a adoptar estos procesos [6].

El objetivo principal del presente estudio ha sido establecer un modelo para la gestión de la incertidumbre geoespacial en la etapa inicial de exploración (estudios geológicos). La incertidumbre se refiere al rango de probabilidades en el que algunas condiciones pueden existir u ocurrir [7]. El análisis se centra en medir la incertidumbre de las fuentes de datos en sus componentes asociados a: precisión de coordenadas proyectadas, georreferenciación y precisión de elevación. La evaluación se ha basado en la asignación de índices de confiabilidad adoptadas según la precisión del dispositivo, equipamiento o procedimiento con que se han realizado las mediciones. De esta manera, es gestionada la confiabilidad de la ubicación de los pozos petroleros exploratorios, generando a la empresa ventaja competitiva y disminución de riesgos.

2. Marco Teórico

2.1 Modelo Exploratorio

A nivel internacional se han desarrollado en las últimas décadas normas que direccionan los contratos entre el ente estatal y las compañías de hidrocarburos que buscan explorar y explotar estos recursos. De esta forma, tanto los contratos de: asociación, servicios, operación, licencia o estrategia, enfrentan las siguientes etapas:

2.1.1 Riesgos Asociados: en cada modelo que se pretenda utilizar, los riesgos propios de la geología, los riesgos financieros, los riesgos sociales y los riesgos operativos en las actividades de exploración, corren por cuenta del inversor privado.

2.1.2 Períodos Sucesivos: el proceso exploratorio está dividido en períodos sucesivos y que son otorgados al inversionista para que este desarrolle un compromiso gradual de nuevos trabajos exploratorios. De esta manera, conforme va obteniendo mayor información, el inversionista puede continuar con la exploración o eventualmente, abandonar el lote.

2.1.3 Descubrimiento Comercial: con una exploración exitosa, el inversionista está en la capacidad de declarar que existen las reservas mínimas requeridas para su comercialización, lo que deber estar acorde al justiprecio del mercado petrolero.

2.1.4 Programas Obligatorios: hace referencia a los trabajos básicos o elementales que el inversionista está obligado a cumplir. Para ello, el Estado solicita garantías económicas a través de la banca, que son ejecutadas en caso de no cumplir con la tarea acordada. Por ejemplo: Programa de levantamiento de "X" Km de Sísmica 2D.

2.1.5 Tipos de Retribuciones: en el Perú existen dos sistemas: retribución en dinero y retribución en especies (gas natural o petróleo crudo).

2.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

En la década del sesenta, el Dr. Roger Tomlinson, conocido como el Padre del SIG implementó el primer Sistema de Información Geográfica de Canadá (CGIS).

- Según ESRI (Environmental Systems Research Institute), "es un sistema para la gestión, análisis y visualización de conocimiento geográfico que se estructura en diferentes conjuntos de información" [8].
- Burrough, (1986): "Un potente conjunto de herramientas para recolectar, almacenar, recuperar a voluntad, transformar y presentar datos espaciales procedentes del mundo real" [9].
- Una definición más aceptada es la dada por (NCGIA, National Center for Geographic Information and Analysis, 1989), "Sistema de hardware, software y procedimientos diseñado para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y presentación de datos referenciados espacialmente para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión" [10].

2.3. Información Geográfica Voluntaria (IGV)

El concepto de Información Geográfica Voluntaria (IGV) fue acuñado por Michael F. Goodchild en el año 2007 y es la información geográfica creada o recogida por voluntarios de forma organizada, que no son necesariamente especialistas y publicada en línea [11].

Según Haklay (2013) [12], el concepto general de "crowdsourcing" es clasificado en cuatro niveles:

- Nivel I: Población
 - Ciudadanos como sensores
 - Computación voluntaria distribuida
- Nivel II: Inteligencia distribuida
 - Ciudadanos como intérpretes básicos
 - Pensamiento voluntario
- Nivel III: Ciencia participativa
 - Participación en la definición del problema y la recolección de datos
- Nivel IV: Ciencia ciudadana extrema
 - Ciencia colaborativa – define problema, recolecta datos y Análisis.

2.4. Incertidumbre

El término "incertidumbre" ha sido asociado a la indecisión y, más aún, se le ha relacionado a la confiabilidad de la medición de un objeto o proceso, tratándose de medir la utilidad de su resultado, usando por ejem-

plo, la desviación típica, en casos particulares (GUM 2.2.1). La Guía para la expresión de la incertidumbre de la medida (GUM) ha permitido agrupar los elementos de la incertidumbre de dos maneras: método de evaluación tipo A y método de evaluación tipo B, las cuales se diferencian en su forma de evaluar las componentes de incertidumbre, basándose ambas en distribuciones de probabilidad. (GUM 3.3.3) [13].

2.4.1. Incertidumbre de Tipo A (U_a): este método está basado en el estudio de la estadística generada por un conjunto de observaciones. (GUM 2.3.2). De esta forma, la mejor valoración esperada " μ_q " de una cantidad " q ", con " n " mediciones autónomas " q_k " es la media aritmética \bar{q} (GUM 4.2.1):

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (1)$$

Por otro lado, la varianza " σ^2 " de esta distribución \bar{q} viene dada por (GUM 4.2.2):

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (2)$$

Tanto la desviación estándar como la varianza nos indican como se dispersan los valores alrededor de la media \bar{q} y pueden ser usadas para medir la incertidumbre (GUM 4.2.3):

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (3)$$

2.4.2. Incertidumbre de Tipo B (U_b): en este caso la estimación de las magnitudes no proceden de observaciones repetidas. La incertidumbre está basada en la información de variación de Xi. La información puede provenir de:

- Mediciones pasadas (históricos).
- Conocimiento de la conducta y atributos de componentes y herramientas.
- Especificaciones técnicas del producto.
- Certificados referentes a la graduación.
- Información relacionada a la certidumbre de las medidas encontradas en *handbooks* (GUM 4.3.1).

2.4.3. Incertidumbre Combinada (U_c): es el resultado de la evaluación de la incertidumbre A y la incertidumbre B, a través de la siguiente fórmula *simplificada* (GUM 5.1.2):

$$U_c = \sqrt{U_a^2 + U_b^2} \quad (4)$$

2.4.4. Incertidumbre Expandida (U): es el intervalo de confianza alrededor de una medición y que genera una cierta cantidad de mesurandos que puede satisfacer

el valor de la medida. La Incertidumbre Expandida (U) se obtiene a través de la siguiente fórmula GUM 6.2.1):

$$U = kuc \quad (5)$$

dónde: " k " es un factor de cobertura.

Ahora bien, en el caso de una variable aleatoria unidimensional Z puede expandirse a tres dimensiones siempre y cuando se obtengan tres valores para la magnitud medida. El resultado está dado por la tupla X, Y, Z . La equivalencia con el intervalo de confianza en una dimensión es el volumen de confianza, que usualmente se describe como una esfera en torno a la mejor estimación del valor verdadero. La probabilidad de que el valor verdadero esté situado dentro de este volumen se calcula mediante la integración de volúmenes sobre la función de densidad tridimensional de la distribución normal. Un volumen esférico es caracterizado por su radio. Este radio es usado como medida de la exactitud de variables aleatorias tridimensionales (ISO 19157:2013, G.3.4) [14].

3. Estado del arte (resumen)

La revisión de distintas metodologías ha permitido evaluar la confiabilidad de los datos de acuerdo a juicio de expertos y se ha ponderado según la escala de Likert (ver Tabla 2) de la siguiente manera: Métodos de Incertidumbre de Datos [15] [16] [17] [18] (ver Tabla 4), Métodos de Transformación de Coordenadas [19] [20] [21] [22] (ver Tabla 5), Métodos de Geodatabase [23] [24] [25] (ver Tabla 6), Métodos de Calidad de Datos [26] [27] (ver Tabla 7) y Métodos de Afines [28] [29] [30] (ver Tabla 8).

Tabla 2. Escala de Likert para comparación de métodos

Escala Likert	
1	Malo
2	Regular
3	Normal
4	Bueno
5	Excelente

El estudio de las matrices que ha sido direccionado por el método Best-Worst-Method (BWM) o Método del Mejor-Peor [31], ha permitido concluir que: el Método de Geodatabase (Control de calidad) obtiene el mayor puntaje (13 puntos) según juicio de expertos, identificándolo claramente como el método apropiado para gestionar la incertidumbre de los datos geográficos. Caso contrario ocurre con la elección del Método de Crowdsourcing, que a pesar de haber obtenido un puntaje bajo (6 puntos) dentro de la categoría de métodos afines, ha sido seleccionado para evidenciar que es susceptible a mejoras si es considerado como una nueva fuente de datos en el proceso de recolección en campo, como también ha sido precisado por Saberi, B. y Ghadiri, N. [27].

3.1. Índices de Confiabilidad

En esta sección se ha descrito los índices de confiabilidad de las fuentes elegidas basados en la precisión del dispositivo, equipamiento o procedimiento, con que se realizan las mediciones (ver Tabla 3).

Tabla 3. Índices de confiabilidad

Fuente de Incertidumbre	Punto	Descripción de índices
Precisión de Coordenadas Proyectadas (XY)	1	Precisión desconocida
	2	> 50 m (Mapa topográfico)
	3	10-50 m (GPS Asistido-AGPS)
	4	1-10 m (GPS Navegador-GPS)
	5	0-1 m (GPS Diferencial-DGPS)
Geo referencia	1	Sin georreferenciación (solo visual)
	2	Georreferenciación Falso positivo.
	3	Georreferenciación (Benchmark)
	4	Georreferenciación (Est. Pasiva)
	5	Georreferenciación (Est. Permanente)
Precisión de Elevación (Z)	1	Precisión desconocida
	2	> 50 m (Modelo Elevación Digital)
	3	10-50 m (GPS Asistido-AGPS)
	4	1-10 m (GPS Navegador-GPS)
	5	0-1 m (GPS Diferencial-DGPS)

4. Metodología

Se ha utilizado un Sistema de Información Geográfica (SIG) para gestionar: los procesos de entrada de datos tradicionales y no tradicionales (*crowdsourcing*), el geoprocesamiento de datos a través de índices de confiabilidad y uso de artefactos para tratar la incertidumbre (donde se ha usado las directrices de la Guía para la expresión de la Incertidumbre GUM-2008 y las recomendaciones del ISO 19157:2013), almacenamiento de la información validada en la Geodatabase y la creación de productos informativos (mapas).

4.1. Visión General del Método Propuesto

En esta sección se muestra de forma general el método propuesto sin profundizar en los detalles, señalando las partes que lo componen y de qué forma se insertan en las etapas del modelo utilizado (ver Figura 1).

4.1.1. Fuente de Datos

Básicamente son dos las principales:

Data Geoespacial Tradicional

Tanto la data pública y privada, en formato de data vectorial se ha trabajado en:

- Shapefiles (shp) y Features
- Archivos CAD (dwg, dxf)

- GPS y DGPS

y la data tabular/atributiva en:

- Tablas (xlsx, dbf, txt)

Data Geoespacial No Tradicional

Es data producto de la colaboración participativa voluntaria. Los datos en formato “gpx” recolectados con:

- Unidades GPS
- Celulares inteligentes con la aplicación GPSLogger

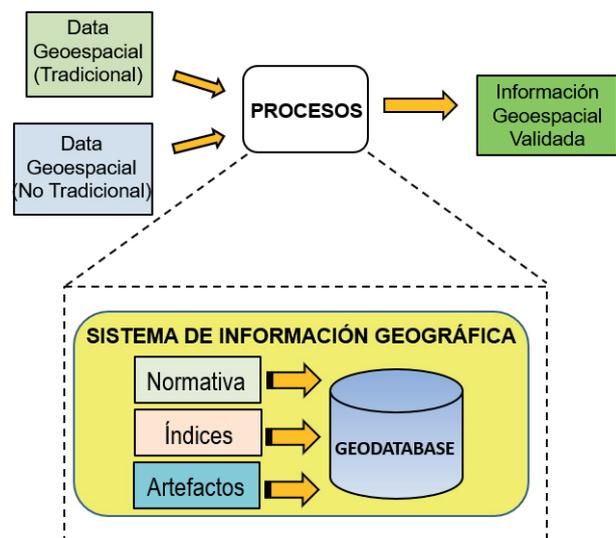


Fig. 1. Visión General del Método Propuesto

4.1.2. Geoprocesos

Estos procesos geoespaciales se hallan enmarcados dentro de las normativas del GUM 2008 e ISO 19157:2013 lo que ha permitido la asignación de los índices de confiabilidad para evaluar las tres fuentes de incertidumbre elegidas:

- Precisión de la Coordenadas Proyectadas
- Georreferenciación en el mapa
- Precisión de la Elevación (Z).

Paralelamente se ha desarrollado los artefactos: “GPXToFC”, “FC2D to FCMean3D” y “Uncertainty Sphere”.

4.1.3. Los Productos Informativos

Una vez que la información geoespacial ha sido validada, se obtiene una información con incertidumbre controlada, lo que ha permitido manejar el riesgo y catalogarla como apta para la toma de decisiones directivas. Este resultado está representado en productos informativos digitales (mapas) que son almacenados en una Geodatabase corporativa [32].

Tabla 4. Métodos de Incertidumbre de Datos

FUENTE DE INCERTIDUMBRE	MÉTODO INCERTIDUMBRE DE DATOS			
	Redes Bayesianas	Conjunto Difuso de Funciones de Membresía	Representación Adyacentes y Coincidentes	Taxonomías prácticas para datos SIG
Precisión de coordenadas proyectadas	2	2	4	2
Georreferenciación	2	2	2	2
Precisión de la Elevación (Z)	2	2	2	2
PUNTAJE	6	6	8	6

Tabla 5. Métodos Transformación de Coordenadas

FUENTE DE INCERTIDUMBRE	MÉTODO TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS			
	Mínimos cuadrados	Geo referenciación Directa	Algoritmo Búsqueda Diferencial	Clúster tramas Programación Genética
Precisión de coordenadas proyectadas	5	2	2	5
Georreferenciación	2	5	5	2
Precisión de la Elevación (Z)	5	2	2	2
PUNTAJE	12	9	9	9

Tabla 6. Métodos de Geodatabase

FUENTE DE INCERTIDUMBRE	MÉTODO GEODATABASE		
	DB4GeO	Desnormalización	Control de Calidad GDB
Precisión de coordenadas proyectadas	4	4	4
Georreferenciación	3	3	4
Precisión de la Elevación (Z)	3	3	5
PUNTAJE	10	10	13

Tabla 7. Métodos de Calidad de Datos

FUENTE DE INCERTIDUMBRE	MÉTODO CALIDAD DE DATOS	
	Limpieza de datos estadístico	Calidad de datos espaciales Basado en muestra
Precisión de coordenadas proyectadas	4	3
Georreferenciación	2	2
Precisión de la Elevación (Z)	2	3
PUNTAJE	8	8

Tabla 8. Métodos Afines

FUENTE DE INCERTIDUMBRE	MÉTODOS AFINES		
	KNIME	Crowdsourcing Spatial	Análisis Topológico
Precisión de coordenadas proyectadas	2	2	4
Georreferenciación	2	2	3
Precisión de la Elevación (Z)	2	2	2
PUNTAJE	6	6	9

4.2. Visión Específica del Método Propuesto

En esta sección se muestra de forma específica el método propuesto, profundizando sobre todo en los elementos del geoprocesamiento, tales como: precisión del equipo, pesos asignados y artefactos (ver Figura 2).

4.2.1. Precisión de equipo y asignación de pesos

Para la asignación de pesos a los índices de confiabilidad, se ha determinado utilizar la precisión de los equipos usados en la medición de las coordenadas [33].

Basado en la fórmula de la media aritmética ponderada, tenemos:

$$W = (I1 + I2 + I3) / (I1 \times P + I2 \times P + I3 \times P) \quad (6)$$

dónde:

I1 = Índice de Confiabilidad de la Precisión de la Coordenadas Proyectadas.

I2 = Índice de Confiabilidad de la Georreferenciación.

I3 = Índice de Confiabilidad de la Precisión de la Elevación.

P = Precisión del equipo en el momento del registro.

W = Peso

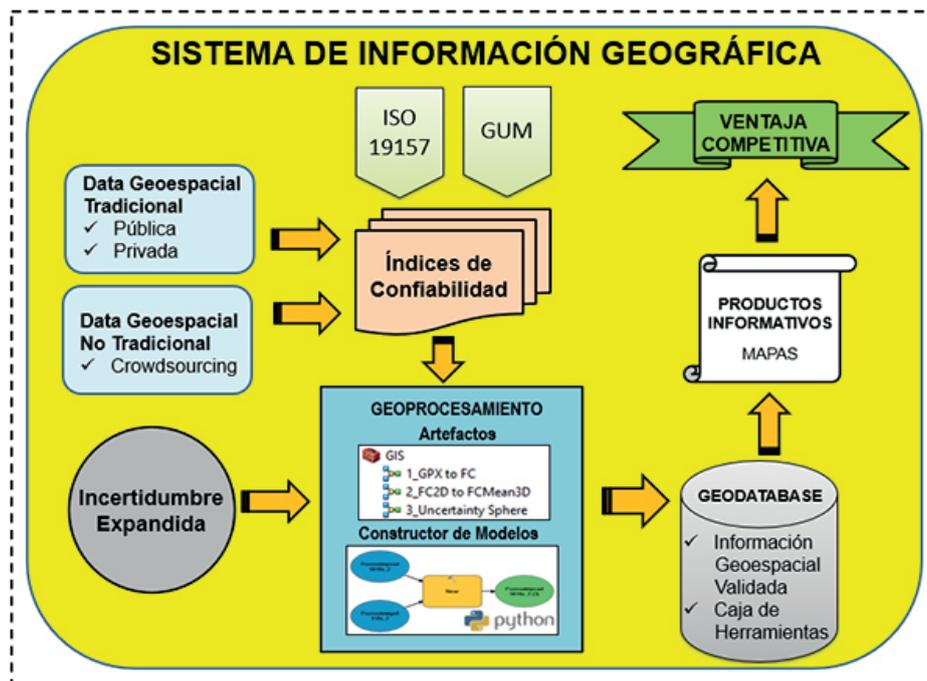


Fig. 2. Visión Específica del Método Propuesto

4.2.2. Evaluación de las incertidumbres de medición

Para el caso de una esfera se tiene que su volumen está caracterizado por su radio, el cual se usa como medida de la exactitud de variables aleatorias tridimensionales. Asimismo, la Guía para la expresión de la Incertidumbre de la medida (GUM) ha permitido analizar los elementos de las incertidumbre a través de la Incertidumbre Tipo A, B, Combinada y Expandida. El resultado de esta medición se expresa de la siguiente manera:

$$Y = y \pm u \quad (7)$$

Esto significa que el resultado de la medición ha sido parametrado en un intervalo que varía entre -u y +u, albergando las posibles soluciones del mesurando “Y”. Además, se debe indicar explícitamente las unidades de “y”.

4.2.3. Artefactos

En esta sección se ha descrito tres artefactos que están basados en el lenguaje de programación Python 2.7 [34] y están almacenados en la caja de herramientas GIS. Estos artefactos son: “GpxToFC”, “FC2D to FC-Mean3D” y “Uncertainty Sphere” (ver Figura 3).

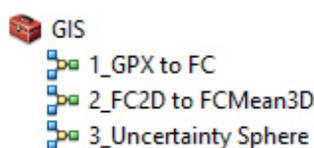


Fig. 3. Artefactos creados en ArcGIS.

GpxToFC: este artefacto ha permitido dos geoprocesos: la conversión de los puntos GPS recolectados por la aplicación GPSLogger desde su formato nativo “gpx”

al formato vectorial “shp” (*shapefile*) y la reproyección de coordenadas del Sistema Geográfico WGS84 al Sistema UTM WGS84 – 18S. Los geoprocesos se han detallado en el constructor de modelos (ver Figura 4).

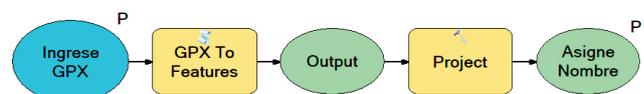


Fig. 4. Constructor de modelos de GpxToFC

FC2DtoFCMean3D: este artefacto ha permitido tres geoprocesos: el cálculo de las coordenadas de los elementos tipo puntos (en este caso los pozos exploratorios), la conversión de los puntos bidimensionales a tridimensionales y el cálculo de la coordenada del centro medio ponderado donde se ha considerado el “peso” calculado a partir de los índices de confiabilidad. Los geoprocesos se han detallado en el constructor de modelos (ver Figura 5).

Uncertainty Sphere: este artefacto ha permitido tres geoprocesos: crea la Esfera de Incertidumbre (elemento de tipo MultiPatch) a partir de la Incertidumbre Expandida, selecciona los pozos ubicados dentro de la referida esfera y se exporta a una nueva capa vectorial denominada “Pozos Validados”. Los geoprocesos se han detallado en el constructor de modelos (ver Figura 6).

Finalmente, la información validada es almacenada en la Geodatabase empresarial (ver Figura 7).

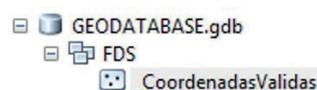


Fig. 7. Coordenadas válidas almacenadas en Geodatabase

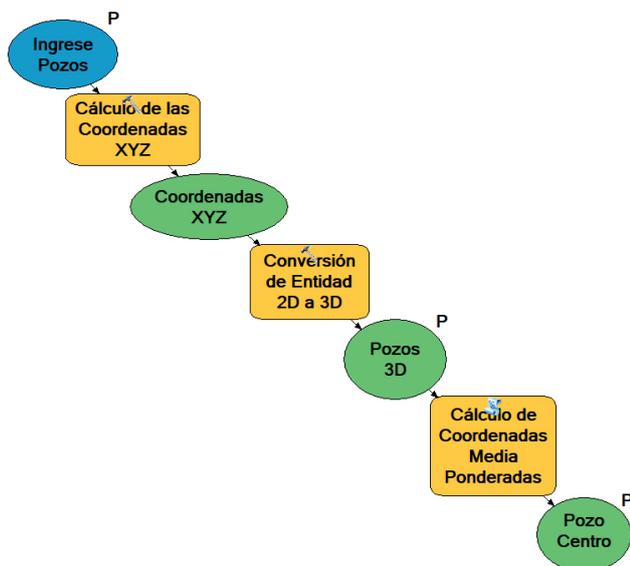


Fig. 5. Constructor de modelos de FC2DtoMean3D

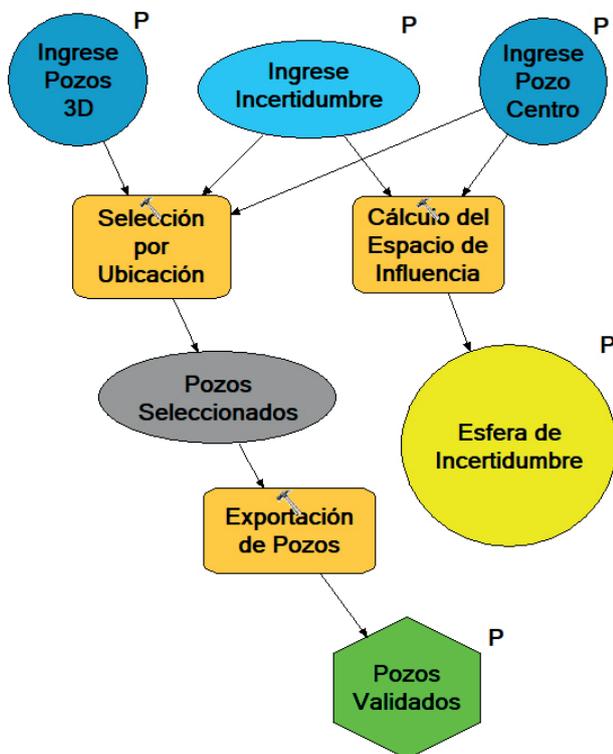


Fig. 6. Constructor de modelos de Uncertainty Sphere

5. Caso de Estudio

El Perú, en donde se han perforado 1996 pozos exploratorios distribuidos en 71 lotes petroleros (Peru-petro, 2017), se encuentra ubicado en el hemisferio sur del planeta y se halla dividido en tres zonas geográficas (husos): 17, 18 y 19; y en tres bandas geográficas: K, L y M. La investigación se ha centrado en la cuadrícula central superior correspondiente a la zona 18 y la banda M, donde se han perforado 215 pozos de los cuales se han considerado como población 145 pozos correspondientes a los 20 lotes existentes en la zona (ver Figura 8). La muestra se ha establecido por estratos sobre una “n”

ajustada de 105 pozos. De acuerdo con el muestreo aleatorio estratificado con criterio de afijación proporcional (ver Tabla 9), se ha considerado las siguientes variables:

Nh: número total de pozos por estrato

Wh: ponderación en cada estrato

Ph: proporción de existencia de sistema geográfico en el estrato h.

Qh: proporción de no existencia de sistema geográfico en el estrato h.

Z: valor normal a un nivel de confianza dado.

E: precisión (error máximo tolerable en la estimación del parámetro).

ne: número representativo de pozos por estrato

no: muestra previa

n: muestra ajustada

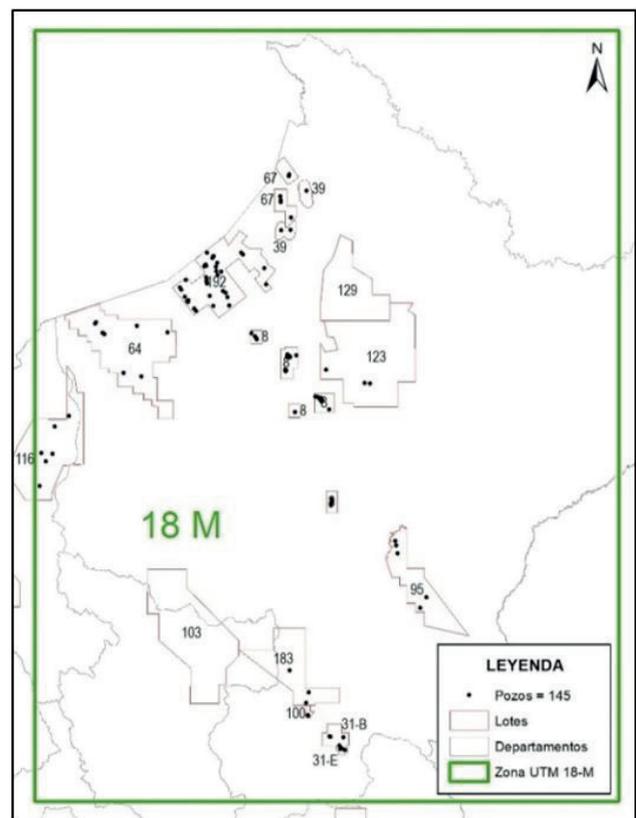


Fig. 8. Pozos ubicados en el huso 18 y zona M.

$$no = \frac{(\sum Wh * Ph * Qh)}{(1 + no/N)} \quad (8)$$

$$n = \frac{no}{(E/Z)^2} \quad (9)$$

De esta manera, se han establecido como base los pozos pertenecientes al lote 192 y se han elegido en forma aleatoria 30 pozos de los 42 perforados. (ver Tabla 10).

5.1. Nivel Inteligencia Distribuida

Se han tomado las coordenadas usando la aplicación GPSLogger con un celular inteligente de la marca Huawei. Además, se ha enviado los archivos generados en formato GPX en tiempo real, a través de la mensajería de WhatsApp a un segundo terminal móvil en oficina. A continuación, se muestra la información de las coordenadas, índices de confiabilidad, precisión y peso del pozo Capahuari Sur 3 usando la aplicación GPSLogger (ver Tabla 11). Paralelamente se ha obtenido las coordenadas del mismo pozo Capahuari Sur 3 haciendo uso de unidad GPS marca Garmin modelo GPSMap60CSx. Esta información se ha transmitido a la oficina vía correo electrónico. A continuación, se muestra la información de las coordenadas, los índices de confiabilidad, precisión y peso de un pozo usando el dispositivo GPSMap 60CSx (ver Tabla 12).

5.2. Análisis y uso de la Esfera de Incertidumbre

Con el fin de validar el método propuesto se ha revisado la información procedente de la fuente oficial de pozos de la base de datos de Perupetro y se ha procesado la información de la Inteligencia Distribuida de la siguiente manera:

Se ha recolectado “n” mediciones independientes y repetitivas de las coordenadas de cada uno de los pozos seleccionados del Lote 192.

$$n = 20 \quad (10)$$

Se ha calculado los Grados de Libertad (g)

$$g = 57 \quad (11)$$

En el cálculo del promedio (\bar{p}) se ha introducido la variable “Peso (W)” producto de los índices de confiabilidad anteriormente definidos.

$$\bar{p} = \frac{1}{nW} \sum_k^n = 1qk \quad (12)$$

y con la desviación estándar del Pozo Capahuari Sur 3 se ha calculado la Incertidumbre Estándar de Tipo A (μ_a)

$$\mu_a = 3.93 \quad (13)$$

Para la Incertidumbre Estándar de Tipo B, se ha calculado los siguientes grados de libertad (l)

$$l = 19 \quad (14)$$

Con respecto a la precisión de los equipos utilizados, se han usado: Equipos GarminMap60CSx = 10 m y celulares de gama alta Huawei = 5 m.

Con estos datos se ha calculado la Incertidumbre Estándar de Tipo B (μ_b).

$$\mu_b = 5 \quad (15)$$

y con las incertidumbres anteriores se ha calculado la Incertidumbre Estándar Combinada (μ_c).

$$\mu_c = 6.36 \quad (16)$$

además, se ha calculado el Número Efectivo de Grados de Libertad (V_{eff}).

$$V_{eff} = 44.09 \quad (17)$$

Y se ha hallado el Factor de Cobertura (K).

$$K = 2.02 \quad (18)$$

Y finalmente se ha encontrado la Incertidumbre Expandida (μ_e).

$$\mu_e = 12.81 \quad (19)$$

Con esta información se ha definido dos nuevos elementos geográficos: la “Esfera de Incertidumbre” que es el espacio geométrico que delimita la indeterminación de la posición de los elementos a partir de la ubicación encontrada en la documentación de Perupetro y, los “Pozos Válidos” que representan a dichos elementos inmersos en la Esfera de Incertidumbre generados a través de la Información Geográfica Voluntaria en su nivel de Inteligencia Distribuida usando GPSLogger y/o GarminMap60CSx (ver Figura 9).

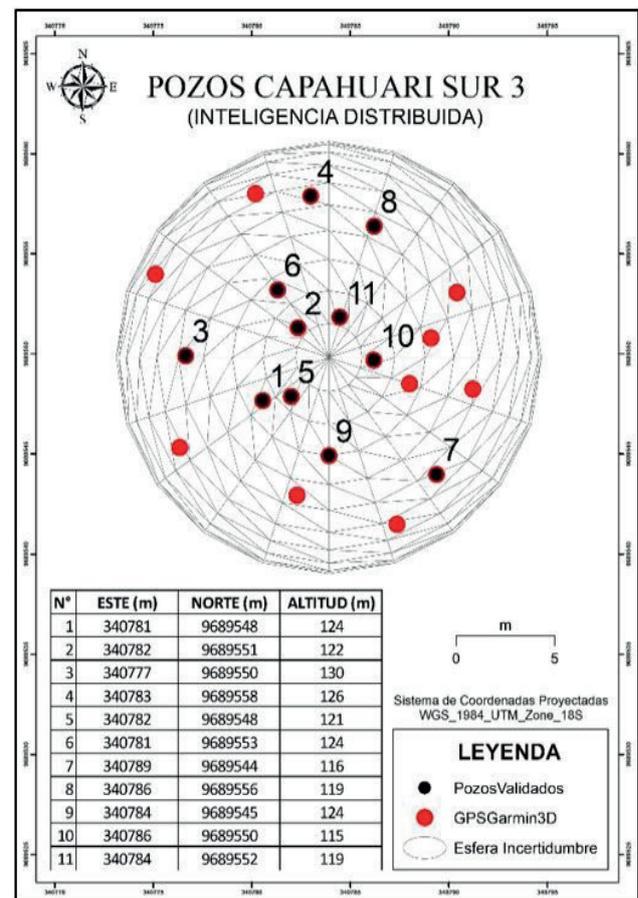


Fig. 9. Pozos Validados en la Esfera de Incertidumbre.

Tabla 9. Muestra de pozos por estratos

Orden	Lote	Nh	Ph	Qh	Wh=Nh/N	PhxQhxWh	ne
1	8	51	0.5	0.5	0.351724138	0.08793103	37
2	31-B	6	0.5	0.5	0.04137931	0.01034483	4
3	31-E	5	0.5	0.5	0.034482759	0.00862069	4
4	39	3	0.5	0.5	0.020689655	0.00517241	2
5	64	10	0.5	0.5	0.068965517	0.01724138	7
6	67	7	0.5	0.5	0.048275862	0.01206897	5
7	95	5	0.5	0.5	0.034482759	0.00862069	4
8	100	4	0.5	0.5	0.027586207	0.00689655	3
9	103	0	0.5	0.5	0	0	0
10	116	6	0.5	0.5	0.04137931	0.01034483	4
11	123	3	0.5	0.5	0.020689655	0.00517241	2
12	129	0	0.5	0.5	0	0	0
13	183	3	0.5	0.5	0.020689655	0.00517241	2
14	192	42	0.5	0.5	0.289655172	0.07241379	30
N=	145	Z=	1.96		ΣPh x Qh x Wh=	0.25	
E=	0.05	no=	384.16		n=	105	

Tabla 10. Muestra de pozos del lote 192.

N°	UWI	POZO	YACIMIENTO	ESTE (m)	NORTE (m)	PROF. (m)
1	1A_13	CAPAHUARI S 3	CAPAHUARI SUR	340782	9689549	3911
2	1A_26	CAPAHUARI S 4	CAPAHUARI SUR	341789	9688457	4040
3	1A_1	CAPAHUARI N 01	CAPAHUARI NORTE	334077	9702603	4297
4	1A_9	CAPAHUARI N 02	CAPAHUARI NORTE	332418	9705180	5579
5	1A_2	CAPAHUARI S 01X	CAPAHUARI SUR	341947	9690353	4263
6	1A167	CAPAHUARI S 31	CAPAHUARI SUR	341790	9690223	3901
7	1A_17	CARMEN 1	CARMEN	360544	9729441	3330
8	1A_57	DORISSA 1	DORISSA	366270	9695562	11517
9	1A_18	FORESTAL EXT 1	FORESTAL	363467	9745259	10600
10	1A_3	FORESTAL 1	FORESTAL	370933	9740963	3658
11	1A_8	FORESTAL 2	FORESTAL	369718	9738820	3133
12	1A_27	FORESTAL 3	FORESTAL	370499	9741196	3133
13	1A_29	FORESTAL 4	FORESTAL	370500	9741194	3110
14	1A_30	FORESTAL 5	FORESTAL	370497	9741198	3103
15	1A_19	HUAYURI N 1	HUAYURI NORTE	362321	9716792	11165
16	1A_33	HUAYURI S 1	HUAYURI NORTE	363560	9709789	10916
17	1A_35	HUAYURI S 2	HUAYURI NORTE	363561	9709787	11180
18	1A_36	HUAYURI S 3	HUAYURI NORTE	363054	9712305	10948
19	1A_38	HUAYURI S 4	HUAYURI NORTE	363054	9712303	11203
20	1A_40	HUAYURI S 5	HUAYURI NORTE	363055	9712308	12500
21	1B_27	JIBARITO 1	JIBARITO	386699	9693967	3244
22	1B_1	JIBARO 1	JIBARO	384703	9699101	3898
23	1A166	JIBARO EXT 1X	JIBARO	381692	9701382	3224
24	1A165	MACUSARI 01X	MACUSANI	339272	9714013	12855
25	1A162	PILAR 1X	PILAR	379899	9723511	3140
26	1A_31	SHIVIYACU NE1	SHIVIYACU	375008	9733734	3329
27	1A161	SHIVIYACU SE1	SHIVIYACU	375730	9719364	3203
28	1A_5	SHIVIYACU 1	SHIVIYACU	373879	9724120	3324
29	1A_10	SHIVIYACU 3	SHIVIYACU	373370	9728914	3137
30	1A_4	TAMBO 01X	TAMBO	348851	9681102	4258

Tabla 11. *Coordenadas, índices, precisión, peso(GPSLogger)*

N°	ESTE (m)	NORTE (m)	ALTITUD (m)	PRECISION	INDICE 1	INDICE 2	INDICE 3	PESO
1	340784	9689542	135	5	4	2	4	0.2
2	340794	9689551	106	5	4	2	4	0.2
3	340781	9689557	125	5	4	2	4	0.2
4	340782	9689534	169	5	4	2	4	0.2
5	340766	9689557	185	5	4	2	4	0.2
6	340776	9689549	131	5	4	2	4	0.2
7	340783	9689554	122	5	4	2	4	0.2
8	340793	9689550	104	5	4	2	4	0.2
9	340786	9689556	119	5	4	2	4	0.2
10	340793	9689546	97	5	4	2	4	0.2
11	340790	9689560	130	5	4	2	4	0.2
12	340778	9689540	154	5	4	2	4	0.2
13	340775	9689563	187	5	4	2	4	0.2
14	340787	9689540	142	5	4	2	4	0.2
15	340795	9689540	110	5	4	2	4	0.2
16	340780	9689556	126	5	4	2	4	0.2
17	340773	9689533	174	5	4	2	4	0.2
18	340775	9689553	138	5	4	2	4	0.2
19	340787	9689546	115	5	4	2	4	0.2
20	340796	9689546	92	5	4	2	4	0.2

Tablas 12. *Coordenadas, índices, precisión y peso (Garmin)*

N°	ESTE (m)	NORTE (m)	ALTITUD (m)	PRECISION (m)	INDICE 1	INDICE 2	INDICE 3	PESO
1	334077	9702607	341	8	2	3	2	0.13
2	334076	9702606	336	9	2	3	2	0.11
3	334076	9702599	301	5	2	3	2	0.20
4	334074	9702597	262	8	2	3	2	0.13
5	334070	9702600	302	6	2	3	2	0.17
6	334075	9702599	294	7	2	3	2	0.14
7	334085	9702598	268	8	2	3	2	0.13
8	334085	9702600	286	5	2	3	2	0.20
9	334079	9702596	271	5	2	3	2	0.20
10	334081	9702599	292	5	2	3	2	0.20
11	334081	9702598	285	5	2	3	2	0.20
12	334074	9702596	253	7	2	3	2	0.14
13	334077	9702601	321	6	2	3	2	0.17
14	334074	9702612	324	6	2	3	2	0.17
15	334074	9702612	329	9	2	3	2	0.11
16	334087	9702603	306	5	2	3	2	0.20
17	334078	9702613	361	5	2	3	2	0.20
18	334077	9702606	338	7	2	3	2	0.14
19	334075	9702598	280	7	2	3	2	0.14
20	334077	9702603	333	8	2	3	2	0.13

6. Resultados

A partir de las Esferas de Incertidumbre y usando el método de Información Geográfica Voluntaria en su nivel de Inteligencia Distributiva, se han validado: seis pozos con el GPSLogger (ver Tabla 13) y once pozos con el GPSMap60CSx (ver Tabla 14).

Tabla 13. Pozos validados usando GPSLogger

N°	ESTE (m)	NORTE (m)	ALTITUD (m)
1	340784	9689542	135
2	340781	9689557	125
3	340776	9689549	131
4	340783	9689554	122
5	340780	9689556	126
6	340775	9689553	138

Tabla 14. Pozos validados usando la Inteligencia Distribuida

N°	ESTE (m)	NORTE (m)	ALTITUD (m)
1	340781	9689548	124
2	340782	9689551	122
3	340777	9689550	130
4	340783	9689558	126
5	340782	9689548	121
6	340781	9689553	124
7	340789	9689544	116
8	340786	9689556	119
9	340784	9689545	124
10	340786	9689550	115
11	340784	9689552	119

Se ha considerado ahora la ubicación dada por la documentación de Perupetro y las ubicaciones de los puntos centrales medios ponderados de las Esferas de Incertidumbre, obtenidas a través de la Inteligencia Distributiva con GPSLogger y GPSTracker, para determinar que los desfases de ubicación con respecto a las coordenadas oficiales son más que aceptables, en función de la mejor estimación del valor atribuible calculada con la Incertidumbre Expandida (IE) para las coordenadas de la Inteligencia Distributiva (ver Tabla 15).

Tabla 15. Mejor estimación de las coordenadas de pozo.

POZO	GPSLOGGER +/-IE	GPSTRAK +/-IE
CAPAHUARI SUR 3	X = 340783.69 +/-12.81	X = 340783.90 +/-10.79
	Y = 9689548.70 +/-12.81	Y = 9689549.83 +/-10.79

7. Conclusiones

A través del estado del arte, donde se ha revisado diversos métodos para mejorar el geoposicionamiento, se ha concluido que el Método de Geodatabase es el adecuado tanto para el geoprocesamiento de la incertidumbre como para el almacenamiento de la información validada.

El estudio de los distintos métodos de procesamiento de datos y de la Guía para la expresión de la Incertidumbre de la medida (GUM), ha permitido concluir que la mejor manera de determinar los Índices de confiabilidad para las fuentes de incertidumbres analizadas en este trabajo, están en función de la precisión del dispositivo, equipamiento o procedimiento con que se han realizado las mediciones.

Además, se ha concluido que el uso de los smartphones con el aplicativo propuesto GPSLogger, aporta valiosa información que complementa a la información oficial del espacio geográfico en estudio. Si bien la Información Geográfica Voluntaria es hoy en día, una fuente valiosa para los distintos tipos de investigaciones, es necesario definir el nivel, o niveles, sobre el cual recolectar los datos. En la presente investigación, el trabajo en el primer nivel (crowdsourcing) con los pobladores de la zona ha sido imposible debido a la falta de equipos (smartphones), a la limitada cobertura de internet, al desinterés de los pobladores y a la falta de acceso a las instalaciones petroleras. Por lo tanto, se ha optado por trabajar sobre el segundo nivel (Inteligencia Distribuida) con personal no relacionado directamente con la empresa (proveedores) y con personal de la empresa del área de Responsabilidad Social que, si contaban con equipos y con cobertura de internet, obteniendo de esta manera una nueva fuente de información.

Con respecto al análisis de la incertidumbre, se ha utilizado el cálculo de la Incertidumbre Expandida para definir a la “Esfera de Incertidumbre”, que es el entorno que alberga la dispersión de las posibles ubicaciones que podrían ser razonablemente atribuidos a la posición real del pozo exploratorio petrolero. Además, el desarrollo del artefacto “Uncertainty Sphere” creado con Python 2.7 dentro del programa geográfico ArcGIS 10.5, ha permitido que sea compatible con otros softwares de código libre.

8. Trabajo Futuro

Dentro de la misma línea de investigación, los estudios geológicos, geoquímicos, atmosféricos y microbiólogos del área a perforar, deberán considerar su incertidumbre asociada y, por ende, la generación de nuevos índices de confiabilidad.

El mayor avance del crowdsourcing y, en particular, la información geográfica voluntaria, requerirá también un desarrollo más formal para determinar niveles estándar de confianza que puedan usarse a nivel global.

La creación de una guía y posteriormente de un ISO, serían los siguientes pasos.

Si bien el análisis de la incertidumbre muestra en forma general el mesurando y su dispersión tridimensional, una revisión a diferentes niveles de confianza todavía puede ser profundizado.

Finalmente, la mayor precisión de los sistemas de navegación registradas en los chips de los celulares, aumentará la precisión a nivel de 1 m o hasta submétricos, por su compatibilidad no solo con el GPS americano y el Galileo europeo, sino también con el GLONASS ruso, con el Beidou chino y con el recién estrenado QZSS japonés.

9. Expresiones de gratitud

Se agradece a la plana docente de la Maestría de Sistemas – GTIC de la Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y en forma particular, al Dr. Glen Rodríguez Rafael y al Mg. Joel Mercado Rojas, quienes marcaron las directrices necesarias para llevar a cabo este trabajo. Se agradece también al grupo de investigación: “The Expendables” por su valiosa ayuda para mejorar este manuscrito. Asimismo se agradece a la empresa Frontera Energy por facilitar el acceso a su base de datos petrolera exploratoria y apoyar con sus equipos, proveedores y personal.

10. Referencias

- [1] Bolaños, R. (2017). Reseña Histórica de la Exploración por Petróleo en las Cuencas Costeras del Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 112, p. 001-013
- [2] Perez-Taiman, J. (2009). Breve reseña de la exploración y explotación de petróleo en el Perú desde el punto de vista legal. *Círculo de derecho administrativo*. Recuperado de <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/derechoadministrativo/article/view/13994>
- [3] [3] Delgado, Tatiana & Cromptvoets, Joep. (2007). Proyecto CYTED - IDEDES 606PI0294 “Evaluación y Potenciación de Infraestructuras de Datos Espaciales para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe”, *Infraestructuras de Datos Espaciales en Iberoamérica y el Caribe*. (Ed): IDICT, Habana, Cuba, (2007), pp. 14-24
- [4] GEOIDEP. (2017). Infraestructura de Datos Espaciales del Perú. Avances y estrategia de implementación al 2021. Recuperado 31 abril, 2018, de <http://www.geoidep.gob.pe/mapeandoperu/presentaciones2017/01-01-SEGDI-Avances-estrategia-perspectivas-IDEP-2021.pdf>
- [5] Bickel, J. y Bratvold, R. (2007). Decision Making in the Oil and Gas Industry: From Blissful Ignorance to Uncertainty-Induced Confusion. Paper SPE 109610 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, 11–14 November. <http://dx.doi.org/10.2118/109610-MS>
- [6] BickMcVay, D. y Dossary, M. (2014). The Value of Assessing Uncertainty. Society of Petroleum Engineers. doi: 10.2118/160189-PA
- [7] Suslick, S., Schiozer, D. y Rodriguez, M. (2009). Uncertainty and risk analysis in petroleum exploration and production. *Terræ*. (6), 30 - 41. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/285137122_Uncertainty_and_risk_analysis_in_petroleum_exploration_and_production
- [8] ESRI (Environmental Systems Research Institute). The Power of Mapping.What is GIS? Recuperado de <http://www.esri.com/what-is-gis>
- [9] Burrough, P.A. (1986) Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment. Monographs on Soil and Resources Survey No. 12, Oxford Science Publications, New York.
- [10] NCGIA, National Center for Geographic Information and Analysis (1989) Cowen, D. (1989). What is a GIS? Recuperado de <http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/gis.notes/ncgia/u01.html#SEC1.1.2>
- [11] Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: Web 2.0 and the volunteering of geographic information. *GeoFocus*, 7, 8-10.
- [12] Haklay, M., (2013). Citizen Science and Volunteered Geographic Information – overview and typology of participation in Sui, D.Z., Elwood, S. and M.F. Goodchild (eds.), 2013. *Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice*. Berlin: Springer. 105-122 doi: 10.1007/978-94-007-4587-2_7
- [13] Evaluation of measurement data — Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Edición digital. https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf
- [14] AENOR (2014). UNE-EN ISO 19157:2014 Información Geográfica – Calidad de datos. AENOR.
- [15] Blackmond L., K., Wright, E., Da Costa, P. (2010), Envisioning uncertainty in geospatial information. *International Journal of Approximate Reasoning*, 51, 209–223, doi.org/10.1016/j.ijar.2009.05.011
- [16] GoodBan, H. y Ahlqvist, O. (2009). Representing and negotiating uncertain geospatial concepts Where are the exurban areas?, *Computers, Environment and Urban Systems*, 33, 233–246, doi.org/10.1016/j.compenvurbsys. 2008.10.001
- [17] Viard, T., Caumon, G. y Lévy, B. (2011). Adjacent versus coincident representations of geospatial uncertainty: Which promote better decisions?, *Computers&Geosciences*, 37, 511–520, doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.004
- [18] Tavana, M., Liu, W., Elmore, P., Petry, F. et al. (2016). A practical taxonomy of methods and literature for managing uncertain spatial data in geographic information systems. *Measurement*, 81, 123–162, doi.org/ 10.1016/j.measurement.2015.12.007
- [19] Soler, T., Han, J.Y. y Weston N.D. (2011). Alternative transformation from Cartesian to geodetic coordinates by least squares for GPS georeferencing applications. *Computers & Geosciences*, 42, 100–109, doi:10.1016/j.cageo.2011.10.026
- [20] Zhao, H., Zhang B., Wuc, C et al. (2013). Development of a Coordinate Transformation method for direct georeferencing in map projection frames. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77, 94–103, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2012.12.004
- [21] Civicioglu P. (2011). Transforming geocentric cartesian coordinates to geodetic coordinates by using differential search algorithm. *Computers & Geosciences*, 46, 229–247, doi:10.1016/j.cageo.2011.12.011

- [22] Wu, C. y Su, W. (2012). Lattice-based clustering and genetic programming for coordinate transformation in GPS applications. *Computers & Geosciences*, 52, 85–94, doi:10.1016/j.cageo.2012.09.022
- [23] Breunig M., Kuper P., Butwilowski E. et al. (2015). The story of DB4Geo – A service-based geo-database architecture to support multi-dimensional data analysis and isualization. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117, 187-205, doi:10.1016/j.isprsjprs. 2015.12.006
- [24] Kingdon A., Nayemil M. L., Richardson A. E. et al. (2016). A geodata warehouse: Using denormalisation techniques as a tool for delivering spatially enabled integrated geological information to geologists. *Computers & Geosciences*, 96, 87-97, doi:10.1016/j.cageo.2016.07.016
- [25] Chesnaux, R., Lambert, M., Walter, J. et al. (2011). Building a geodatabase for mapping hydrogeological features and 3D modeling of groundwater systems: Application to the Saguenay–Lac-St.-Jean region, Canada. *Computers & Geosciences*, 37 (11), 1870 – 1882, doi:10.1016/j.cageo.2011.04.013
- [26] Hu Y., Chen H., Li G. et al. (2015). A statistical training data cleaning strategy for the PCA-based chillersensor fault detection, diagnosis and data reconstruction method. *Energy and Buildings*, 112, 270-278, doi:10.1016/j.enbuild.2015.11.066
- [27] Saberi B. y Ghadiri N. (2016). A Sample-Based Approach to Data Quality Assessment in Spatial Databases with Application to Mobile Trajectory Nearest-Neighbor Search. *Journal of Computing and Security*, arXiv:1409.2819
- [28] Baura, J., Moreno-Villanueva, M., Kötterb, T., Sindlingera, T. et al. (2015). MARK-AGE data management: Cleaning, exploration and visualization of data. *Mechanisms of Ageing and Development*, 151, 38-44, doi:10.1016/j.mad.2015.05.007
- [29] Heipke, C. (2010). Crowdsourcing geospatial data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, 550-557, doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.06.005
- [30] Thiele, S., Jessell, M., Lindsay, M. et al. (2016). The topology of geology 1: Topological analysis, *Journal of Structural Geology*, 91, 27-38, doi.org /10.1016/ j.jsg. 2016.08.009
- [31] Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49 – 57, doi.org/ 10.1016 /j. omega.2014.11.009
- [32] Zeiler, M. Modeling Our World. The ESRI Guide to Geodatabase Design. Redlands. 1999. ESRI Press. 199 p.
- [33] Ta-Kang Yeh (2015). Calibration of the GNSS Receivers — Methods, Results and Evaluation, Satellite Positioning Shuanggen Jin, IntechOpen, doi: 10.5772/ 58887. Recuperado de [https://www.intechopen.com /books/ satellite-positioning-methods-models-and-applications/calib ration-of-the-gnss-receivers-methods-results-and-evaluation](https://www.intechopen.com/books/satellite-positioning-methods-models-and-applications/calibration-of-the-gnss-receivers-methods-results-and-evaluation)
- [34] Python. What is Python? Documentation. Executive Summary. Recuperado de <https://www.python.org/doc/ essays/ blurb/>