

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN DE TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN DE CUERPOS GEOLÓGICOS EN 3D

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS MENCIÓN GEOLOGÍA
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

MARCIA VALENTINA OJEDA CARREÑO

PROFESOR GUIA:
MARCELO FARÍAS THIERS

PROFESOR CO-GUIA:
FELIPE NAVARRO VARGAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
REYNALDO CHARRIER GONZÁLEZ
JUAN BECERRA MIRANDA

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por FONDEF IDeA, en dos etapas, ID16I10186 y el proyecto FONDECYT 1161806

SANTIAGO DE CHILE
2019

**RESUMEN DE LA TESIS Y MEMORIA PARA
OPTAR AL GRADO DE:** Magíster en Ciencias
Mención Geología, **Y TÍTULO DE:** Geóloga
POR: Marcia Valentina Ojeda Carreño
FECHA: 23/12/2019
PROFESOR GUÍA: Marcelo Farías Thiers

METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN DE TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN DE CUERPOS GEOLÓGICOS EN 3D

Para evaluar restauraciones geológicas en secciones balanceadas o superficies es ampliamente aceptado verificar la preservación de área, espesores y largos de línea o las distancias en la dirección de cizalle. En el caso de cuerpos en 3D se pueden considerar métricas similares, e incorporar la conservación de volúmenes y masas.

En este trabajo se expone el desarrollo de una metodología que busca cuantificar restauraciones de cuerpos geológicos en 3D con la motivación de minimizar las incertezas en un modelo estructural producidas por cambios volumétricos y de masa asociados a las metodologías de deformación. Los cuerpos utilizados en este estudio se representan como modelos de bloques regulares, que son una discretización del volumen en cubos de igual tamaño. Cada uno de estos bloques son representados por un punto ubicado en el centroide y, por ende, el análisis de la restauración se realiza en una nube de puntos en 3D.

A partir de un análisis inductivo se crea la métrica e índice de restauración capaz de cuantificar modelos de bloques restaurados. Para validar la métrica se trabajó con 45 casos sintéticos de estructuras simples, específicamente pliegues por flexión de falla, por propagación de falla y anticlinales de rollover. Estos se modelaron con el software Move2017 a partir de distintos algoritmos, como los son cizalle simple, flujo paralelo y trishear. Una vez restaurados se procedió a cuantificar la metodología de restauración, la cual se basa en un sistema dinámico masa resorte.

A partir de los casos explorados, esta metodología desarrollada es una herramienta que permite validar cuantitativamente la calidad de una restauración estructural, aportando información relevante como lo son las cantidades de variación exacta en cada uno de los ejes, los vectores de distancia para cada punto, además de poder visualizar en 3D las zonas con mayor error asociado. Por último, a partir de los resultados es posible concluir qué tipo de estructura se restaura de mejor manera y bajo cuál metodología de deformación.

VALIDATION METHODOLOGY FOR 3D GEOLOGICAL BODIES RESTORATION TECHNIQUES

In order to evaluate geological restorations in balanced sections or surfaces it is widely accepted to verify the preservation of area, thicknesses and line lengths or distances in the direction of shear. In the case of 3D bodies, similar metrics can be considered, and the conservation of volumes and masses can be incorporated.

In this work the development of a methodology that seeks to quantify restorations of geological bodies in 3D with the motivation of minimizing the uncertainties in a structural model produced by volumetric and mass changes associated with deformation methodologies is presented. The bodies used in this study are represented as regular block models, which are a discretization of the volume in cubes of equal size. Each of these blocks are represented by a point located in the centroid, and therefore the analysis of the restoration is performed in a cloud of 3D points.

From an inductive analysis, the metric and the restoration index are created, which are capable of quantifying restored block models. To validate the metric, 45 synthetic cases of simple structures were used, specifically with fault-bend folds, fault-propagation folds and rollover anticlines. These were modeled with Move2017 software from different algorithms, such as simple shear, parallel flow and trishear. Once restored, the restoration methodology was quantified, which is based on a dynamic spring mass system.

Based on the cases investigated, this developed methodology is a tool that allows to quantitatively validate the quality of a structural restoration by providing relevant information such as the amounts of exact variation in each of the axes, the distance vectors for each point, in addition to be able to visualize in 3D the areas with the greatest associated error. Finally, based on these results it is possible to conclude which type of structure is best restored and under which deformation methodology.

*Dedicada a las mujeres de mi familia:
Marsia, Esmeralda Violeta, Esmeralda Paola,
Paula Esmeralda, Paloma Esmeralda y Amanda*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a FONDEF ID16I10186 y FONDENCYT 1161806 por financiar esta tesis y, a Midland Valley y al Laboratorio ALGES por proporcionar las licencias de Move y U-Fo utilizadas en este trabajo. De igual manera agradecer al laboratorio de Tectónica y Paleomagnetismo y al Centro Avanzado de Tecnología para la Minería AMTC (CONICYT/PIA Proyecto AFB180004), ambos de la Universidad de Chile.

Agradezco a todas las personas que ayudaron en el desarrollo de esta tesis, a Marcelo Farías, profesor guía de este trabajo, gracias por tu constante preocupación por esta investigación y por compartir tus visiones de la geología y la sociedad conmigo. A Felipe Navarro, gracias por depositar tu plena confianza en mí para cumplir este desafío, por tu excelente disposición para responder mis inquietudes y por compartir el entusiasmo en cada etapa lograda de esta tesis. Agradezco también a Reynaldo Charrier y Juan Becerra por todas sus correcciones y sugerencias para este trabajo. Al laboratorio ALGES, por enriquecer el desarrollo de la tesis, y de manera especial a Joaquín Prieto por todo su aporte en este trabajo. Al Team AMTC, por todos los cafés compartidos y el mutuo apoyo durante el postgrado, a los amigos de la carrera de geología y plan común, de manera especial a Coni y Andrea, grandes amigas, confidentes y motivadoras para finalizar de la mejor manera este período universitario.

Quiero agradecer profundamente a mi familia, quienes han sido fuente infinita de amor y apoyo en cada etapa de mi vida. Gracias a ustedes soy quien soy y me han alentado a desarrollar al máximo mis capacidades. A mi mamá, Marsia, gracias por mostrarme con tu ejemplo día a día a ser una mujer perseverante, luchadora y optimista. A mi papá, Juan, gracias por enseñarme el valor de la justicia y a desarrollar con entusiasmo mis pasiones. A mis abuelos, Esmeralda y Juan, gracias por su amor incondicional, por estar siempre presentes en mi vida y llenar mi memoria de buenos momentos junto a ustedes. A mi tía Laly, te agradezco todos los consejos y tu constante aliento para que cumpla todas mis metas. A mi tío Nano, gracias por darme la seguridad de poder contar contigo siempre. A mis primas Amanda y Paloma, gracias por todas nuestras conversaciones, por inspirarme a ser una mejor persona y por todos los buenos momentos compartidos, he aprendido mucho de ustedes. A mi hermana Pally, gracias por ser mi gran compañera, he tenido la suerte de poder compartir muchas experiencias junto a ti y me siento afortunada de que formes parte de mi vida desde que tengo memoria.

Por último, agradezco a las personas que formaron parte de mi vida universitaria, a todos quienes llenaron mis días de alegría y cariño estos años y me apoyaron constantemente.

A todos ustedes muchísimas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO	2
1.4 METODOLOGÍA GENERAL	2
1.4.1 Metodología asociada a objetivo específico 1	2
1.4.2 Metodología asociada al objetivo específico 2.....	6
CAPÍTULO 2: MECANISMOS DE PLEGAMIENTOS	10
2.1 INTRODUCCIÓN	10
2.2 TIPOS DE PLIEGUES	10
2.2.1 Pliegue por flexura de falla.....	11
2.2.2 Anticlinal de <i>rollover</i>	11
2.2.3 Pliegue por propagación de falla	12
2.3 MODELAMIENTO DE CASOS DE ESTUDIO	13
2.3.1 Descripción de los modelos <i>forward</i> aplicados para cada tipo de pliegue.....	14
2.3.2 Aplicación de los modelos <i>forward</i> para cada tipo de pliegue.....	18
CAPÍTULO 3:RESTAURACIÓN USANDO UN SISTEMA DINÁMICO MASA-RESORTE. 25	
3.1 INTRODUCCIÓN A LAS METODOLOGÍAS DE RESTAURACIÓN.....	25
3.1.1 Secciones balanceadas	25
3.1.2 Restauración de Superficies.....	26
3.1.3 Restauración de Volúmenes	26
3.2 SISTEMA DINÁMICO DE MASA-RESORTE.....	27
3.2.1 Obtención de Superficie de Referencia	27
3.2.2 Aplanamiento de la Superficie de Referencia	29
3.2.3 Aplanamiento del Modelo de Bloques	33
CAPÍTULO 4: MÉTRICAS DE VALIDACIÓN DE RESTAURACIÓN	34

4.1	MÉTRICA DE VECTOR TRASLACIÓN	34
4.2	MÉTRICA DE VECINOS MÁS CERCANOS	37
4.2.1	Etapas de la Métrica de Vecinos más Cercanos	37
4.2.2	Discusión sobre Métricas de Validación	40
4.3	RESULTADOS DE MÉTRICA DE RESTAURACIÓN	42
4.3.1	Resultados: Pliegue por Flexura de Falla	43
4.3.2	Resultados: Anticlinales de Rollover	45
4.3.3	Resultados: Pliegue de Propagación de Falla	47
4.4	Discusión Resultados métricas de restauración	50
CAPÍTULO 5: ESTIMACIÓN DE RECURSO NATURAL		55
5.1	ESTIMACIÓN DE RECURSOS	55
5.2	CATEGORIZACIÓN DE RECURSOS	59
5.3	ÍNDICE DE RESTAURACIÓN CASO MINERALIZADO	62
5.4	DISCUSIÓN RECURSOS NATURALES	63
CAPÍTULO 6: SUMARIO		64
BIBLIOGRAFÍA		66
ANEXOS		70
A.	Eventos de deformación casos	70
B.	Estadísticas de variación casos de estudio Métrica Vector de Traslación	74
C.	Estadísticas de precisión casos de estudio Métrica Vecinos más Cercanos	77
D.	Estadísticas de caso mineralizado con Métrica Vecinos más Cercanos	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla que asocia los casos de estudio, numerados del 1 al 45, con sus respectivos tipos de pliegue y metodología de deformación.	3
Tabla 2. Resumen eventos de deformación caso mineralizado.	8
Tabla 3. Principales características de los restados representativos de los pliegues por flexura de falla.	44
Tabla 4. Principales características de los restados representativos de los anticlinales de rollover.	46
Tabla 5. Principales características de los restados representativos de los pliegues por propagación de falla.	48
Tabla 6. Promedio de los resultados por clase asociados a la métrica Vector de Traslación (VT), Vecinos más Cercanos (VC) e Índice (I).	50
Tabla 7. Comparación de categorización de recursos usando método tradicional y U-Fo.	59
Tabla 8. Resumen comparativo indicador de estimación.	61
Tabla 9. Resumen comparativo indicador de varianza.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema que relaciona los tres estados de un mismo modelo de bloques y sus respectivas relaciones.	4
Figura 2. Etapas para generar el modelo de bloques inicial. Paso 1: crear superficies que representan la base y techo de las diferentes litologías. Paso 2: Creación de los bloques entre las superficies. Paso 3: Puntos ubicados en el centroide de cada bloque.	5
Figura 3. Esquema que representa los pasos a seguir de la metodología asociada al objetivo específico 2.	7
Figura 4. Pliegue por flexura de falla teórico. Las flechas indican la vergencia de la falla y las líneas segmentadas son planos axiales que separan los bancos de otros bancos que tengan distinta orientación. Tomada de (Poblet, 2004).	11
Figura 5. Modelo de un anticlinal de <i>rollover</i> y falla lítrica. (a) Estado sin deformar de la sección que contiene una potencial falla lítrica. (b) El bloque colgante ha sido extendido una distancia e , creando un área rectangular, A , que es la misma área que se forma en el espacio vacío entre el bloque colgante y el bloque yacente. (c) El bloque colgante se debe deformar hasta formar un anticlinal de <i>rollover</i> si el bloque colgante se mantiene en contacto con la falla. El área A sobre el <i>rollover</i> es igual al producto entre la profundidad del nivel de despegue, d , y la extensión, e . Modificada de Dula, 1991, (después de Gibbs, 1983).	12
Figura 6. Pliegue por propagación de falla teórico. Las flechas indican la vergencia de la falla y las líneas segmentadas son ejes axiales que separan los bancos de otros bancos que tengan distinta orientación. Modificada de Poblet (2004).	13
Figura 7. Esquema con tres modelos cinemáticos de diferentes tipos de pliegues. (a) Evolución cinemática de un pliegue por flexura de falla teórico (b) con longitud, espesor y área constante, a partir de una estructura flat-rampa-flat propuesto por Suppe (1983). (b) Evolución cinemática de un anticlinal de <i>rollover</i> por una falla lítrica, basada en Gibbs, (1983). (c) Evolución cinemática de un pliegue por propagación de falla teórico con longitud, espesor y área de las capas constante desarrollado sobre un cabalgamiento formado por un rellano inferior y una rampa según el modelo propuesto por Suppe & Medwedeff (1990).	13
Figura 8. Modelo evolutivo de un anticlinal de <i>rollover</i> . (a) Estado inicial del cuerpo. (b) Se produce la extensión generando un espacio vacío entre el bloque colgante y bloque yacente. (c) Geometría del anticlinal de <i>rollover</i> resultante, en verde el largo de los Pins entre la posición del plano de falla inicial al producirse la extensión (en negro) y el marcador horizontal en el bloque colgante, en amarillo la distancia de los Pins entre el plano de falla (en rojo) y el marcador horizontal en el bloque yacente una vez generado el anticlinal de <i>rollover</i> . Se impone que estas distancias se midan en la dirección de los vectores de cizalle y que sean iguales las distancias para cada tramo. Modificada de la bibliografía de Move2017.	15

Figura 9. Ejemplo de deformación a partir del algoritmo de flujo paralelo a la falla. (a) Estado inicial del modelo previo a la compresión. (b) Modelo deformado con las líneas de flujo y bisectores marcados.	16
Figura 10. Geometría básica de trishear descrita por Erslev (1991) y Hardy & Ford (1997). Modificada de Allmendinger (1998).	17
Figura 11. Ejemplos de diferentes configuraciones de los parámetros de tasa de P/S y ángulo de trishear para pliegues de propagación de falla modelados por trishear.	18
Figura 12. Vista en perspectiva, planta y transversal de distintos pliegues por flexura de falla, específicamente los casos 1, 7 y 12.	19
Figura 13 Vista en perspectiva, planta y transversal de distintos anticlinales de <i>rollover</i> , específicamente los casos 16, 22 y 26.	20
Figura 14. Vista en perspectiva, planta y transversal de distintos pliegues por propagación de falla, específicamente los casos 31, 36 y 42.	21
Figura 15. Pliegue por flexura de falla modelado por el algoritmo de flujo paralelo a la falla.	22
Figura 16. Anticlinal de <i>rollover</i> modelado por el algoritmo cizalle simple.	22
Figura 17. Pliegue por propagación de falla modelado por el algoritmo de trishear.	23
Figura 18. Distintas secciones de modelos. Caso 1 modelado por cizalle simple, caso 21 modelado por flujo paralelo a la falla, caso 42 modelado por trishear, variaciones de longitud de 4.6%, 8.9% y 10% respectivamente.	24
Figura 19. Ejemplo de una sección estructural balanceada y retrodeformada de la zona SubAndina sur de Bolivia. Tomada de Moretti et al. (2007).	26
Figura 20. Ejemplo de análisis de componentes principales. (a) Conjunto de datos originales graficados según sus coordenadas del eje x e y. (b) Reposición de los datos en función de los nuevos ejes, pc2 y pc1. (c) Gráficos de los datos unidimensional en función de pc1 y pc2. Modificada de Powell & Lehe (2012).	28
Figura 21. Ejemplo de PCA tridimensional. (a) Nube de puntos tridimensional. (b) Valores graficados según los ejes x,y,z; pc1,pc2,pc3. (c) Resultados al aplicar PCA, gráfico de los datos según los ejes pc2 y pc1. Modificada de Powell & Lehe (2012).	28
Figura 22. En la parte superior: modelo de bloques con su respectiva superficie de referencia formada por una triangulación de tamaño de grilla de $5 \times 5 \text{ m}^2$. En la parte inferior: superficie del modelo de referencia.	29
Figura 23. Sistema masa-resorte. P_1 , P_2 , P_3 , representan masa y las conexiones entre las masas, resortes. Durante la deformación, la distancia entre P_1 y P_3 en la superficie plana es menor a la distancia correspondiente en la superficie inicial por lo que se repelen. Entre P_2 y P_3 ocurre el caso contrario.	30

Figura 24. Esquema en 2D de la variación de los resortes. En la parte superior, modelos la superficie original. Parte inferior, modelo de la superficie aplanada.	31
Figura 25. (a) Vista en planta de una superficie de referencia de un modelo deformado. (b) Vista en planta de la superficie de referencia restaurada con la energía final de cada nodo.	32
Figura 26. Superficie de referencia separada en dos dominios. Dominio azul: donde se concentra la deformación. Dominio rojo: parte de la superficie plana que no requiere restauración.	33
Figura 27. (a) Esquema de <i>raytracing</i> . Proyección desde los bloques hasta intersectar un triángulo de la superficie de referencia en el estado deformado. (b) Bloques desplazados en función de la restauración de los triángulos de la SR, con la condición de que se conserve la distancia.	33
Figura 28. Esquema que muestra las posiciones del modelo inicial (MI) en azul, modelo deformado (MD) en morado y modelo restaurado (MR) en rojo de un caso de estudio.	34
Figura 29. Resultados de métrica de Vector de Traslación para el caso 1. En la columna de “Vector traslación” se muestran los tres vectores de traslación, respecto al punto inicial, final y centroide; en azul el modelo inicial y en naranja el modelo restaurado. En la columna “Resultados variación”, se muestran los resultados de restauración al aplicar la métrica Vector de Traslación. En la parte inferior se muestra el modelo deformado y el restaurado con los valores de variación finales. ...	36
Figura 30. Caso 8 restaurado y aplicado la métrica de Vector de Traslación. En la parte superior el modelo deformado y en la inferior el modelo restaurado.	37
Figura 31. Ejemplo de vecinos cercanos de un bloque. (a) Bloque en amarillo con sus vecinos más cercanos en rojo. (b) Modelo de bloques inicial con un bloque destacado en amarillo con sus vecinos más cercanos. (c) Modelo de bloques restaurado, en amarillo el mismo bloque del modelo inicial y en rojo los vecinos más cercanos, en las nuevas posiciones posterior a la deformación y restauración del modelo.	38
Figura 32. Resultado de la restauración del caso 1. (a) Medidas de restauración al aplicar la métrica Vecinos más Cercanos. (b) Índices de cada bloque para cada punto del modelo.	40
Figura 33. Resultados visualizados en el modelo deformado del caso 1. (a) Índices obtenidos de la comparación del modelo inicial vs restaurado visualizados en el modelo deformado. (b) Índices obtenidos de la comparación del modelo inicial vs modelo deformado visualizados en el modelo deformado.	41
Figura 34. Resultados de métricas de restauración para casos representativos de pliegues por flexura de falla, la escala se mide en metros.	43
Figura 35. Resultados de métricas de restauración para casos representativos de anticlinales de <i>rollover</i>	45
Figura 36. Resultados de métricas de restauración para casos representativos de pliegues por propagación de falla.	47
Figura 37. Histogramas de los índices de los casos representativos al aplicar la métrica Vecinos más Cercanos. Im: índice del modelo.	49

Figura 38. Caso 1 con su estado deformado en la parte superior y el estado restaurado en la parte inferior. En ambos se ha graficado el índice de restauración asociado a cada punto del modelo. Índice de restauración del cuerpo 528.	51
Figura 39. Caso 21 con su estado deformado en la parte superior y el estado restaurado en la parte inferior. En ambos se ha graficado el índice de restauración asociado a cada punto del modelo. Índice de restauración del cuerpo 668.	52
Figura 40. Caso 41 con su estado deformado en la parte superior y el estado restaurado en la parte inferior. En ambos se ha graficado el índice de restauración asociado a cada punto del modelo. Índice de restauración del cuerpo 1806.	52
Figura 41. Esquema en 2D obtención de superficie de referencia. En negro un pliegue asimétrico, los puntos rojos representan los puntos que el algoritmo obtiene de la vista en planta del modelo con la posición a mayor altura de cada punto. En amarillo la superficie obtenida.	53
Figura 42. Ejemplo de pliegue de propagación de falla volcado en su estado deformado en la parte superior y su estado restaurado en la parte inferior, con lo valores de índices de restauración respectivos. Índice de restauración del cuerpo 7284.	54
Figura 43. Estado inicial y deformado del modelo que representa un caso mineralizado.	55
Figura 44. (a) Vista en planta del estado inicial del caso sintético que representa un yacimiento. (b) Modelo de bloques deformado con sus respectivas leyes. (c) Modelo deformado visto en planta con sondajes sintéticos.	55
Figura 45. Variograma modelado con los datos del variograma experimental tradicional. Las direcciones para el variograma son NS, EW y vertical.	56
Figura 46. Variograma modelado para variograma experimental U-Fo. Las direcciones para el variograma son NS, EW y vertical.	57
Figura 47. (a) Ley de cobre para caso tradicional vista en planta. (b) Ley de cobre para caso U-Fo vista en planta.	58
Figura 48. (a) Varianza de estimación caso tradicional. (b) Varianza de estimación caso U-Fo.	58
Figura 49. Categoría de recursos vista en planta siendo 1: medidos, 2: indicados y 3: inferido. (a) Categorización caso tradicional. (b) Categorización caso U-Fo.	60
Figura 50. (a) Indicador del error de estimación. (b) Indicador de la varianza.	61
Figura 51. Vista en planta del modelo restaurado al aplicar la métrica vecinos cercanos.	62
Figura 52. Dominio con menor índice de restauración. Esta zona fue delimitada en la superficie de referencia, categorizándola como el dominio que no se restaura.	63

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los recursos naturales han jugado un rol fundamental en la sociedad a lo largo de la historia. Cada vez son mayores los esfuerzos por identificar nuevas fuentes de energía, optimizar procesos de extracción y disminuir la incertidumbre en la estimación de recursos y reservas. En los últimos 30 años, la Geoestadística ha destacado como la principal herramienta de estimación de recursos naturales. Esta rama de la estadística aplica modelos probabilísticos a datos ubicados en el espacio y utiliza las correlaciones espaciales para simular; por esta razón, es de vital importancia disponer, para la estimación, de datos ubicados correctamente en el espacio.

Como, producto de procesos de deformación, se generan fracturas y pliegues en un sector donde hay presencia de un potencial cuerpo mineralizado explotable, el error asociado a la estimación aumenta, debido a que las distancias originales entre los datos se encuentran distorsionadas. Como solución a esta problemática el Laboratorio Avanzado de Geoestadística y Supercómputo, ALGES, que forma parte del Centro Avanzado de Tecnología para la Minería, AMTC, de la Universidad de Chile, ha desarrollado un software de restauración para cuerpos geológicos de geometrías complejas en 3D.

Existen distintas metodologías de restauración, las cuales varían según sus algoritmos. Los primeros trabajos en esta área fueron orientados al aplanamiento de superficies, donde se aplicó un enfoque geométrico, utilizando el método de elementos finitos que emplea como principio en la minimización de mínimos cuadrados de *gaps* y *overlaps*. En trabajos posteriores se consideró un enfoque mecánico, incorporando variables como el comportamiento elástico de los materiales donde la deformación se representa utilizando tensores de deformación lagrangianos. Actualmente, la restauración de volúmenes es un problema abierto, donde algunos autores en trabajos recientes (Horna et al., 2010; Moretti, 2008; Tang et al., 2017) han propuesto métodos basados en minimización de tensores elásticos de deformación y la integración de ecuaciones de dinámica de puntos a partir de las fuerzas aplicadas por la deformación.

La nueva metodología propuesta, restaura un volumen en función de una superficie de referencia (SR), la cual se representa como un sistema dinámico de Masa-Resorte. En esta triangulación (SR) los vértices son modelados como resortes y las aristas como masas puntuales. El aplanamiento de la superficie se resuelve aplicando ecuaciones de dinámica, y la restauración del volumen se hace en función del aplanamiento de la SR.

Una vez realizada la restauración surge una nueva problemática: ¿Cómo saber si es correcta la restauración? Esta pregunta, a su vez se puede subdividir en varias otras, tales como: ¿Es posible cuantificar este error y visualizarlo en un modelo en 3D?; ¿Cuál es el error asociado a la restauración?; ¿Cuáles son los principales factores que influyen en la restauración?; ¿Bajo qué parámetros, intrínsecos al proceso de deformación, se obtiene un mejor resultado?

Estas interrogantes son las que motivan el presente trabajo de investigación, el cual busca dar respuesta a estos cuestionamientos, creando métricas, es decir, un método de medición que cuantifique el resultado asociado a algoritmos de restauración geológica en 3D. La metodología por testear en este trabajo es la del Sistema Dinámico Masa-Resorte, realizando, además de la cuantificación del resultado, un análisis de los principales factores influyentes en la restauración.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general del estudio es crear una herramienta que evalúe metodologías de restauración geológicas en 3D y sea capaz de cuantificar la calidad de la restauración estructural entregando resultados de manera numérica y visual. Con la motivación de identificar los principales factores que influyen en una metodología de restauración y analizar el impacto directo de la restauración en la evaluación de recursos naturales en la subsuperficie.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Proponer métricas de validación de metodologías de restauración de cuerpos geológicos en 3D que sea posible cuantificar y crear un índice de restauración asociado a las métricas
2. Analizar el impacto en la estimación de un recurso natural, asociado a un cuerpo geológico, al realizar una restauración estructural del cuerpo previa a su estimación

1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO

La hipótesis de este trabajo es que se puede evaluar y cuantificar una metodología de restauración para modelos geológicos tridimensionales. Esta evaluación se realiza por medio de una métrica que cumpla con ser comparativa y fácil de entender. Además, se plantea que una restauración estructural, previa a la estimación de un recurso natural, mejora y disminuye las incertezas asociadas a la estimación.

1.4 METODOLOGÍA GENERAL

La metodología se divide en dos secciones, donde cada sección se enfoca en cumplir uno de los objetivos específicos del trabajo de tesis y están conformadas por distintas etapas las cuales se pasan a describir a continuación.

1.4.1 Metodología asociada a objetivo específico 1

1. Trabajo con casos de estudio
2. Creación de métricas de validación de restauración
3. Análisis de resultados

Para este trabajo se utilizó el software estructural Move2017 de *Midland Valley y de Petroleum Experts*, principalmente el módulo 3D de Modelamiento Cinemático, específicamente la sección de “3D Move-on-Fault” del *suite Move©*. Esta sección tiene tres algoritmos cinemáticos que tienen como objetivo imitar los mecanismos de deformación, medidos a partir de las relaciones geométricas de las estructuras. Estos son cizalle simple, flujo paralelo a la falla y trishear, los cuales se pueden usar para modelos tanto compresionales como extensional. En la sección 2.3 MODELAMIENTO DE CASOS DE ESTUDIO se describen de manera detalla.

1.4.1.1 Trabajo con casos de estudio

a. Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica para obtener el estado del arte que incorporó dos ejes principales: metodologías de deformación y metodologías de restauración. Dentro de las metodologías de deformación se estudiaron los principios cinemáticos de tres algoritmos: cizalle

simple, flujo paralelo a la falla y trishear, la cuales se detallan en la página 14 (Descripción de los modelos *forward*). Estos algoritmos fueron escogidos ya que se utilizaron para generar los pliegues de los casos de estudio, que son los pliegues por flexura de falla, anticlinales de *rollover* y pliegues de propagación de falla (ver página 10, CAPÍTULO 2: MECANISMOS DE PLEGAMIENTOS).

Por otra parte, la revisión de las metodologías de restauración existentes hasta la actualidad incorpora modelos en 2D y 3D, desde secciones balanceadas hasta restauración de superficies y volúmenes.

b. Elaboración de casos de estudio

Para este trabajo se realizaron 45 casos sintéticos, los cuales fueron elaborados utilizando el software de modelamiento y análisis estructural Move2017 de *Midland Valley* y de *Petroleum Experts*. Los casos de estudio tienen dos características principales que los clasifican en distintas clases del 1 al 9, estas características son la metodología de deformación y el tipo de pliegue. La manera en que se distribuyeron los casos se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla que asocia los casos de estudio, numerados del 1 al 45, con sus respectivos tipos de pliegue y metodología deformación.

Tipos de pliegue	Cizalle Simple	Flujo Paralelo a la Falla	Trishear
Pliegue por flexura de falla	1-5 (clase 1)	6-10 (clase 2)	11-15 (clase 3)
Anticlinal de rollover	16-20 (clase 4)	21-25 (clase 5)	26-30 (clase 6)
Pliegue por propagación de falla	31-35 (clase 7)	36-40 (clase 8)	41-45 (clase 9)

Como el objetivo principal de la tesis se relaciona con la estimación de recursos naturales, se optó por trabajar los casos como modelos de bloques. El modelo de bloques es una discretización de un cuerpo en cubos de igual tamaño y es la manera que la industria minera utiliza para estimar los recursos en los yacimientos (Luo et al., 2007; Maretto & Zavala, 2005).

Para poder evaluar la metodología de restauración, es necesario tener un modelo deformado que restaurar, pero a su vez se requiere tener un modelo objetivo con el cual comparar el modelo restaurado. Por esta razón, para cada caso de estudio se realizaron dos modelos, uno inicial (estado pre-deformación) y uno deformado (estado post-deformación), de esta manera, una vez restaurado el modelo deformado, es posible comparar el modelo restaurado con el inicial. La Figura 1 esquematiza la relación entre cada uno de los estados del modelo.

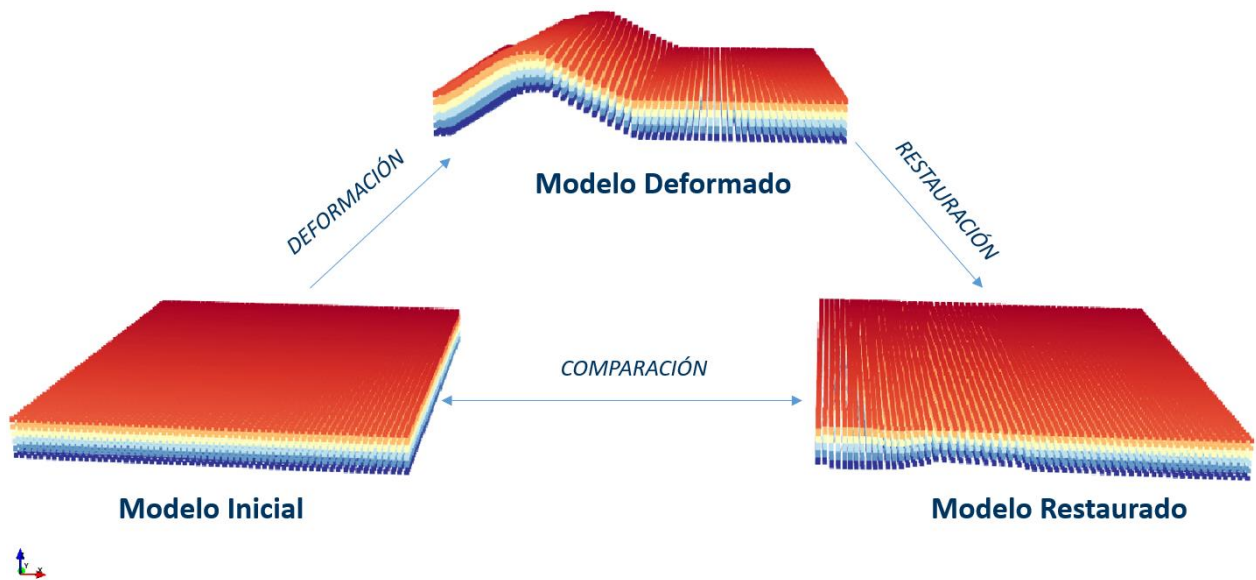


Figura 1. Esquema que relaciona los tres estados de un mismo modelo de bloques y sus respectivas relaciones.

Los estados iniciales del modelo se pueden dividir en dos grupos. El primero conformado por los casos de pliegues por flexura de falla y los de propagación de falla y el segundo por los anticlinales de *rollover*. El primer grupo tiene las mismas características en los estados iniciales, un paralelepípedo de dimensiones $300 \times 300 \times 30 \text{ m}^3$ y bloques de $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$, a diferencia del segundo grupo, que tiene geometrías iniciales distintas para cada caso, las cuales dependen de la geometría de la falla, en estos casos lístrica, que genera la deformación e igual dimensiones para los bloques del modelo. En ambos grupos, la deformación y posterior restauración se realizó únicamente en el bloque colgante.

Los pasos para generar un modelo inicial se detallan a continuación y en la Figura 2:

1. Se generan superficies que representan la base y techo de diferentes litologías
2. A partir de los límites litológicos se generan volúmenes discretizados en bloques
3. A partir de los volúmenes se crean puntos ubicados en los centroides de cada bloque del volumen

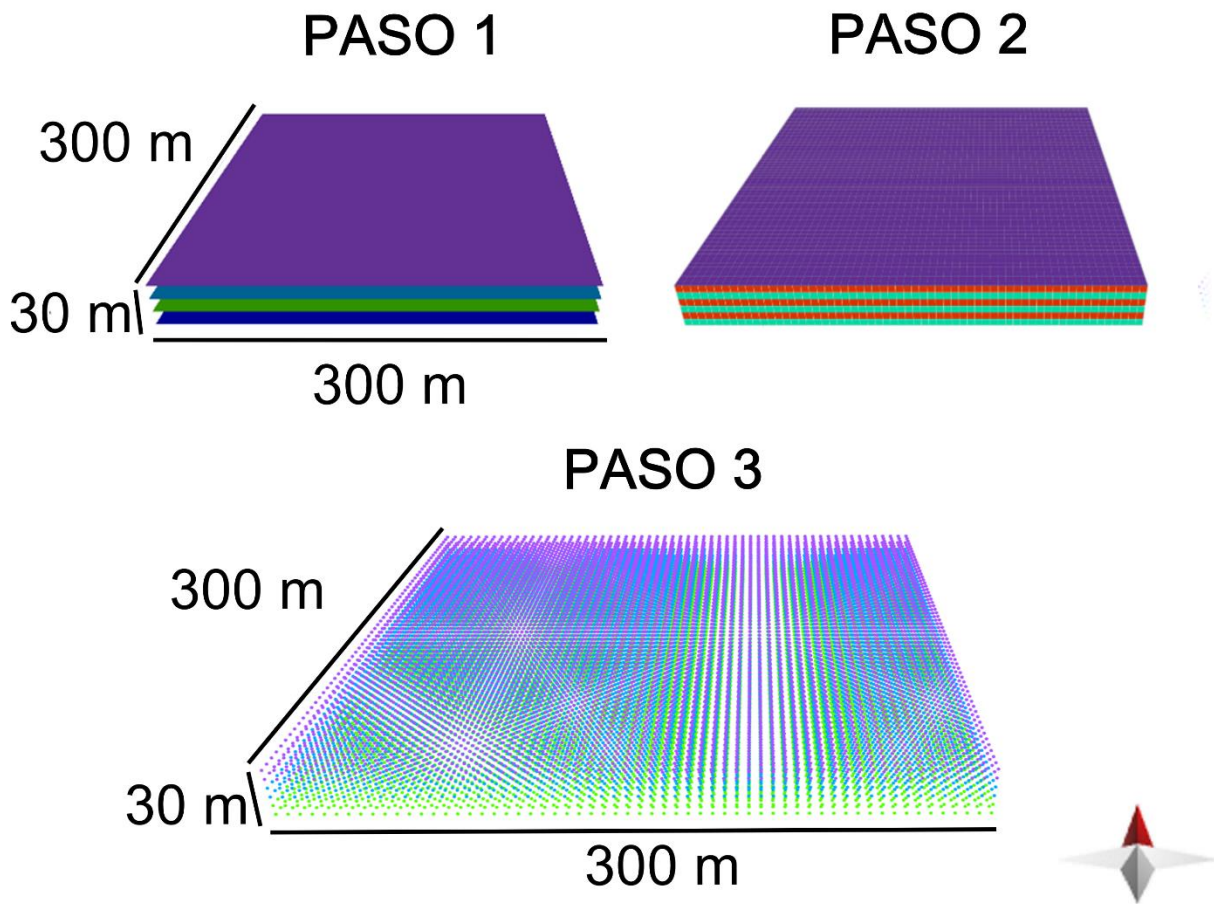


Figura 2. Etapas para generar el modelo de bloques inicial. Paso 1: crear superficies que representen la base y techo de las diferentes litologías. Paso 2: Creación de los bloques entre las superficies. Paso 3: Puntos ubicados en el centro de cada bloque.

Para deformar los casos iniciales se utilizó el módulo 3D de Modelamiento Cinemático, específicamente la sección de “3D *Move-on-Fault*” del *suite Move*©. Esta sección cuenta con tres algoritmos de deformación los cuales son: cizalle simple (*Simple Shear*), flujo paralelo a la Falla (Fault Parallel Flow) y Trishear. Estos algoritmos se basan en principios cinemáticos que pretenden imitar los mecanismos de deformación observados en el campo, medidos a partir de relaciones geométricas de estructuras (Egan et al., 1997; Erslev & Rogers, 1993; Hardy & Ford, 1997; Poblet & McClay, 1996; Suppe, 1983; Suppe & Medwedeff, 1990).

Cada modelo de bloques fue deformado en función de una o más de una falla, y la geometría de las fallas varió dependiendo del régimen estructural deseado, el que en este trabajo fue compresión y extensión. Para los estilos de deformación en compresión: *flat-ramp-flat* y *flat-ramp*, con ángulos de rampa menores a 45°, y para el estilo en extensión se utilizaron fallas lítricas.

Una vez generados los estados iniciales de los modelos y las fallas asociadas, se procedió a deformar. La deformación de los bloques colgantes fue con un desplazamiento constante y cizalle vertical en todos los casos. La descripción de los eventos de deformación para cada caso se detalla en el Pliegue por flexura de falla modelado por cizalle simple, información como número de eventos, cantidad de fallas y el plano de transporte, entre otros.

La descripción completa de los casos de estudio y algoritmos utilizados en la deformación se detallan en el CAPÍTULO 2: MECANISMOS DE PLEGAMIENTOS.

c. Restauración de casos de estudio basado en un sistema dinámico Masa-Resorte

La restauración de los casos de estudio se realizó con el software U-Fo, del Laboratorio Avanzado de Geoestadística y Supercómputo, ALGES, de la Universidad de Chile. Esta metodología, propuesta en parte por Navarro et al. (2016) tiene como objetivo restaurar vetas de yacimiento en geometrías complejas para mejorar la estimación del recurso natural. El detalle de este método se describe en el Capítulo III: Restauración Sistema Dinámico Masa-Resorte.

1.4.1.2 Creación de métricas de validación de restauración

Para el trabajo de tesis se propusieron dos métricas de validación, Métrica de Vector de Traslación y Métrica de Vecinos más Cercanos. Estas métricas deben lograr cuantificar la exactitud de la restauración y se basan en principios geométricos. Cada una de ella se detalla en el Capítulo IV: Métricas de Validación de Restauración.

1.4.1.3 Creación de índice de restauración

A partir del análisis de los resultados asociados a las métricas se crea un índice que sea capaz de otorgar un valor numérico a la restauración del modelo y, que a su vez sirva para comparar entre distintos casos restaurados con diferentes metodologías de restauración.

1.4.2 Metodología asociada al objetivo específico 2

La siguiente metodología se subdivide en 3 etapas:

1. Generación de un caso de estudio modelado como un tipo de yacimiento
2. Trabajo en función de la estimación del recurso
3. Comparación de resultados

La Figura 3 representa el flujo de trabajo asociado a esta metodología y a continuación se describe de manera detalla cada una de las etapas.

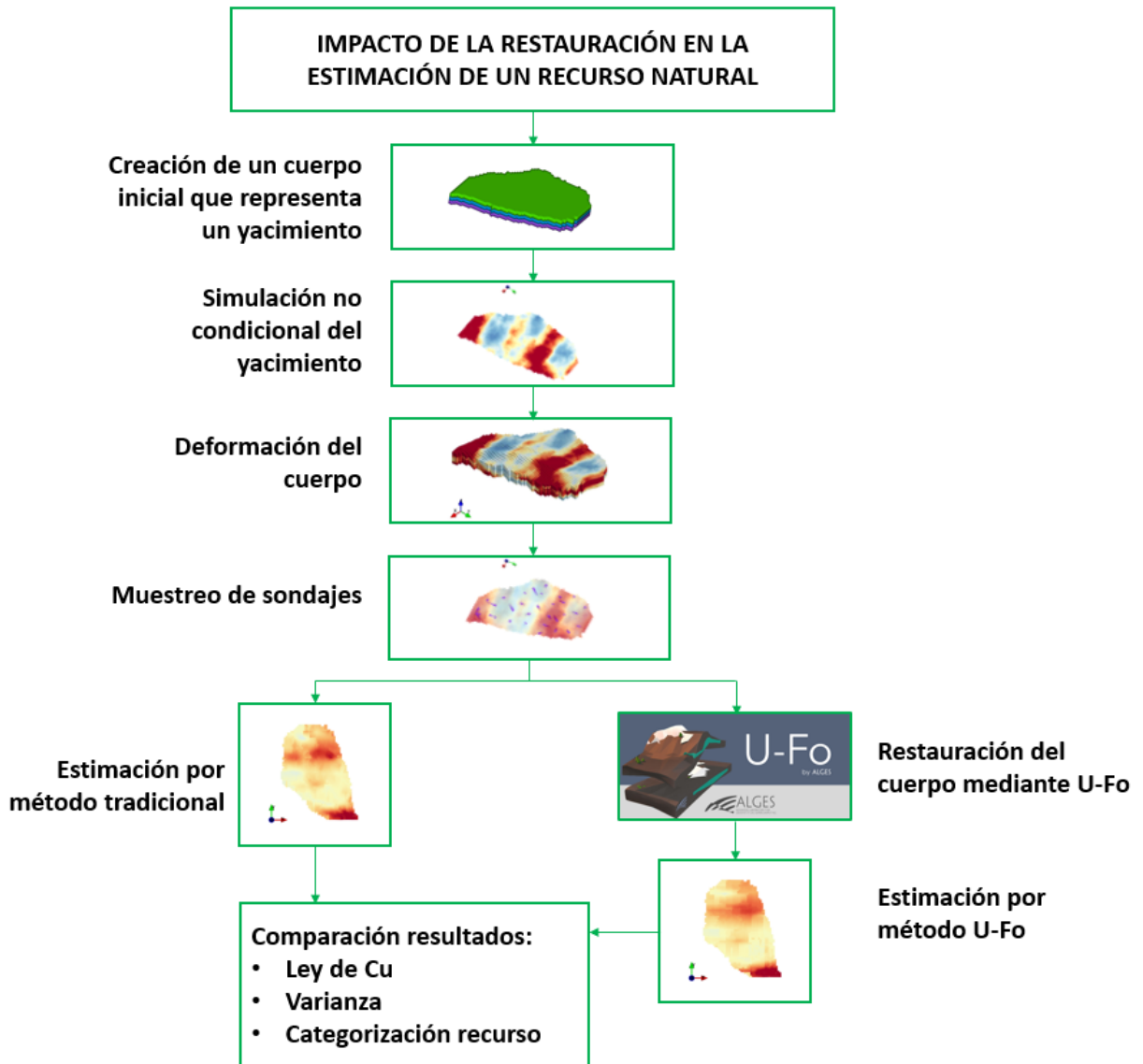


Figura 3. Esquema que representa los pasos a seguir de la metodología asociada al objetivo específico 2.

1.4.2.1 Generación de un caso de estudio modelado como un tipo de yacimiento

En esta sección se aplica de manera general la metodología asociada al objetivo específico 1. La diferencia radica en que, además, se trabaja con simulaciones geoestadísticas para estimar el recurso natural de interés mediante dos metodologías: una basada en el método tradicional y otra por medio de una restauración.

a. Creación de caso de estudio

El caso de estudio se trabaja como un modelo de bloques, y al igual que en la sección anterior, éste se genera utilizando el software Move2017. El estado inicial del modelo tiene una forma irregular para semejar un caso realista de depósito. En el Capítulo V: Estimación de Recurso Natural, se describe de manera detallada la creación del modelo inicial.

b. Simulación no condicional de un yacimiento de cobre

En el estado inicial se realizó una simulación no condicional de un yacimiento de cobre mediante el algoritmo de bandas rotantes del software ANDES (Soto et al., 2017). Se utilizó el variograma exponencial con los siguientes parámetros:

$$\gamma(h) = 0.20 + 0.80 \cdot \exp(150,75,15)$$

De esta manera se obtuvo la ley para cada uno de los bloques del modelo inicial.

c. Deformación de caso de estudio

El caso de estudio se deforma mediante el software Move2017. Los algoritmos utilizados fueron flujo paralelo para los dos primeros eventos de deformación y cizalle simple para los dos últimos eventos. Cada una de las fallas tiene una forma de *flat-rampa-flat*. En la *Tabla 2* se resumen los eventos.

Tabla 2. Resumen eventos de deformación caso mineralizado.

Evento	Algoritmo Deformación	Desplazamiento [m]	Azimuth [°]
Evento 1	Flujo paralelo a la falla	20	84
Evento 2	Flujo paralelo a la falla	30	61
Evento 3	Cizalle simple	50	67
Evento 4	Cizalle simple	80	0

d. Muestreo de yacimiento modelado

Con el caso deformado se realizaron sondajes para muestrear el yacimiento con una malla regular de 40 m × 80 m con un largo de composición de 2 m y un largo total de 30 m. Para obtener el valor de las muestras de cada sondaje, se utilizó el vecino más cercano obtenido a partir del valor de la ley de los bloques del yacimiento.

e. Restauración del caso de estudio

La restauración se realizó con el software U-Fo, metodología detalla en la sección 1.4.1.1, subetapa c. Restauración de casos de estudio basado en un sistema dinámico Masa-Resorte.

1.4.2.2 Evaluación de recursos del yacimiento

Se realizaron dos tipos de estimaciones del recurso natural, denominadas Método Tradicional y Método U-Fo.

a. Método Tradicional

Consiste en estimar el recurso utilizando el modelo deformado y los valores de ley obtenidos a partir de los sondajes mediante kriging ordinario.

b. Método U-Fo

Consiste en restaurar el modelo deformado y trasladar los sondajes a su respectiva posición en el modelo restaurado utilizando el algoritmo del software U-Fo. Una vez restaurado el modelo se procede a estimar el yacimiento con los datos de los sondajes en sus nuevas posiciones.

Tanto para los métodos de estimación tradicional como de U-Fo se realizó un análisis variográfico el cual fue validado mediante la técnica estadística *Jackknife*. Esta técnica es utilizada para validar el modelo teórico del variograma, la vecindad elegida, y finalmente comparar la calidad de varios modelos de variogramas o vecindades posibles (Emery, 2013). Para realizar la validación se dividen los datos en dos subconjuntos y se estiman los datos del primer subconjunto a partir de los datos del segundo subconjunto.

1.4.2.3 Comparación de resultados

Para determinar la validez de los resultados utilizando el Método Tradicional y Método U-Fo, se comparó la cantidad de bloques que se lograron estimar y la categorización de los modelos. Para esto último, en ambos casos, para encontrar la varianza de corte se consideró una producción diaria para un *Room and Pillar* de 2500 ton/día con 350 días al año para obtener la producción anual (875 KTon) y trimestral (292 KTon) y la malla óptima de categorización para recursos inferidos-indicados fue de 25 m x 25 m y para medidos-indicados es de 15 m x 15 m.

CAPÍTULO 2: MECANISMOS DE PLEGAMIENTOS

2.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se centra en la restauración de la estructura, por ende, comprender los conceptos de restauración y deformación es fundamental. La deformación se define como la transformación de la geometría de un cuerpo inicial en otra final debido a traslación, rotación, distorsión y/o cambio de volumen (Fossen, 2010). Si este cuerpo se considera como una o varias capas litológicas ubicadas en la corteza, la deformación se genera como pliegues y fallas. La restauración, por otra parte, consiste en remover los efectos de deformación tectónica con el fin de recuperar el estado deposicional de las capas litológicas y tiene como objetivo principal validar la interpretación de modelos geológicos (Durand-Riard et al., 2010; Santi et al., 2002).

La restauración es una herramienta con la capacidad de cuantificar los movimientos asociados con la deformación geológica; proporciona una visión fundamental del crecimiento de pliegues o fallas en tres dimensiones; las interacciones entre fallas y la cinemática; y las relaciones espaciales entre los procesos de deformación y sedimentación (Rouby et al., 2000). Por lo tanto, ayuda a entender escenarios geodinámicos, reduce incertezas estructurales testeando la consistencia de modelos estructurales y sirve para cuantificar la extensión y compresión asociada a la deformación (Durand-Riard et al., 2010).

Una de las grandes potencialidades de la restauración geológica es el impacto que tiene en la exploración y estimación de recursos, tanto de la industria petrolera como minera, ya que disminuye la incerteza al validar modelos estructurales y restaurarlos (Horna et al., 2010; Maerten & Maerten, 2006; Poudret et al., 2011; Prevost et al., 2005; Santi et al., 2002). Además, la restauración estructural tiene una estrecha relación con los recursos naturales, ya que las ideas pioneras enfocadas a restauración fueron realizadas por geólogos relacionados a la exploración de hidrocarburos, cuyos trabajos se centraron en secciones transversales (Hossack, 1979).

En este capítulo se describe de manera detallada la elaboración de los casos de estudio. Se explica la cinemática de los pliegues, los diferentes algoritmos para generarlos y las razones por las cuales fueron seleccionados para este trabajo de tesis.

2.2 TIPOS DE PLIEGUES

La deformación en los niveles superficiales de la corteza, sobre la zona de transición frágil-dúctil, se representa por una gran variedad de pliegues. Generalmente los pliegues se relacionan estrechamente con las fallas, tanto espacial como temporalmente, originándose a partir del desplazamiento en fallas adyacentes y se pueden clasificar en función de sus propiedades geométricas, cinemáticas y a veces mecánicas (Poblet, 2004; Suppe, 1983). Pero no solo las características del desplazamiento de fallas y tensor de esfuerzos asociados influyen en la generación de un pliegue, otros factores relevantes son las variaciones reológicas, presencia de fluidos, espesores de las capas, y la existencia de estructuras previas (Giambiagi et al., 2009; McClay & Buchanan, 1992), por lo que poder clasificar los pliegues no es tarea sencilla.

En este trabajo se utilizan tres tipos de pliegues: pliegue por flexura de falla, pliegue por propagación de falla y pliegue de anticlinal de *rollover*.

2.2.1 Pliegue por flexura de falla

Los pliegues por flexura de falla se producen debido al cabalgamiento del bloque colgante sobre una falla no plana (Rich, 1934) (Figura 4). La cinemática detrás de estos pliegues fue descrita por Suppe (1983), y de manera general los describe como un pliegue que se forma de manera posterior a la falla, donde el desplazamiento del bloque colgante es paralelo a la falla. Existe una estrecha relación entre la geometría de la falla y la que va adquiriendo el pliegue a medida que se genera, como se aprecia en la Figura 7a. Los supuestos para la generación de este tipo de pliegues son la conservación de área en la sección transversal y espesor constante de las capas respecto a la normal de las curvaturas, lo que implica conservación de la longitud de líneas estratales antes y después de la deformación y desplazamiento paralelo a la deformación (Suppe, 1983). Estos tipos de pliegues se pueden producir en diferentes configuraciones estructurales, como por ejemplo cinturones de fajas plegadas y corridas, “*drag reverse*” y estructuras tipo flor, asociadas a niveles de despegues, fallas normales y fallas de rumbo respectivamente (Suppe, 1983).

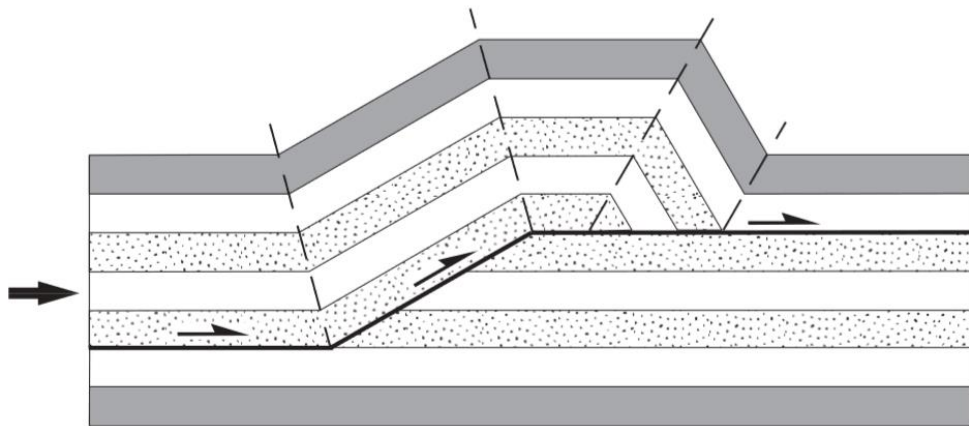


Figura 4. Pliegue por flexura de falla teórico. Las flechas indican la vergencia de la falla y las líneas segmentadas son planos axiales que separan los bancos de otros bancos que tengan distinta orientación. Tomada de (Poblet, 2004).

2.2.2 Anticlinal de *rollover*

El anticlinal de *rollover* es un tipo de pliegue que se produce, a diferencia del anterior, debido a estructuras lítricas, que son fallas normales no-planar. El bloque colgante colapsa en respuesta al desplazamiento sobre la falla normal generando un pliegue. La forma de este pliegue es el resultado de: la geometría de la falla normal; el desplazamiento total de la falla después de la deposición de un estrato; la dirección del movimiento relativo de las partículas de colapso del bloque colgante; la historia de las tasas de sedimentación relativo a las tasas de desplazamiento de la falla; y la compactación (Xiao & Suppe, 1992) (Figura 7b). Cuando el bloque colgante se desplaza a lo largo de la falla lítrica, se genera un espacio entre este bloque y la falla, lo que hace que colapse el bloque colgante sobre el yacente produciendo el anticlinal (Niemeyer, 1999) (Figura 5).

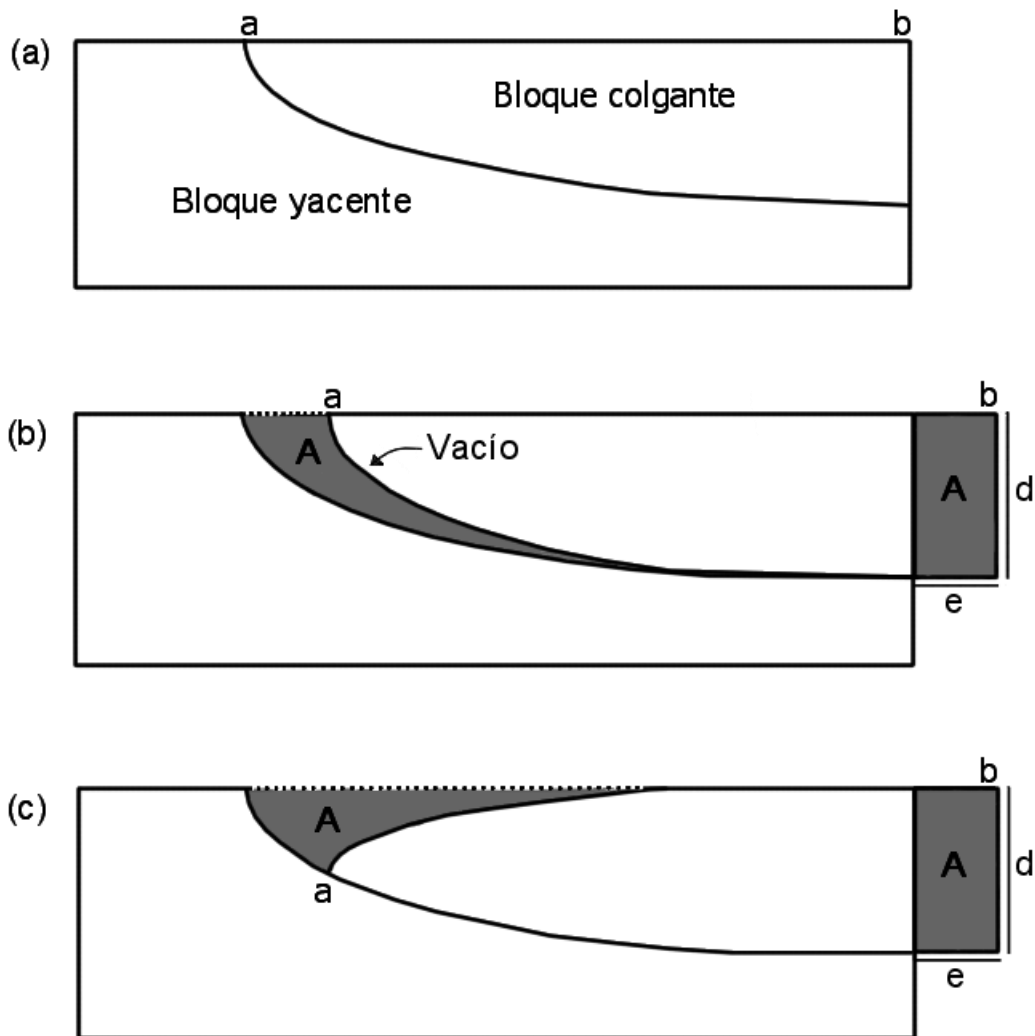


Figura 5. Modelo de un anticlinal de *rollover* y falla lístrica. (a) Estado sin deformar de la sección que contiene una potencial falla lístrica. (b) El bloque colgante ha sido extendido una distancia e , creando un área rectangular, A , que es la misma área que se forma en el espacio vacío entre el bloque colgante y el bloque yacente. (c) El bloque colgante se debe deformar hasta formar un anticlinal de *rollover* si el bloque colgante se mantiene en contacto con la falla. El área A sobre el *rollover* es igual al producto entre la profundidad del nivel de despegue, d , y la extensión, e . Modificada de Dula, 1991, (después de Gibbs, 1983).

2.2.3 Pliegue por propagación de falla

A diferencia de los pliegues por flexura de falla, los pliegues por propagación de falla se producen de manera simultánea a la rampa de la falla y el desplazamiento a lo largo del corrimiento disminuye progresivamente, siendo siempre cero en la punta de la falla (*tip point*) (Figura 6), produciendo un pliegue asimétrico. Por esta razón el pliegue siempre tiene la misma forma y posición en relación con la punta de la falla que se propaga (Jamison, 1987; Suppe & Medwedeff, 1990). (Figura 7c). El flanco frontal del pliegue posee un manteo más elevado que el flanco trasero cuando la rampa mantee suavemente, y viceversa cuando las rampas poseen buzamientos elevados debido a que el flanco trasero del pliegue es paralelo a la rampa (Poblet, 2004).

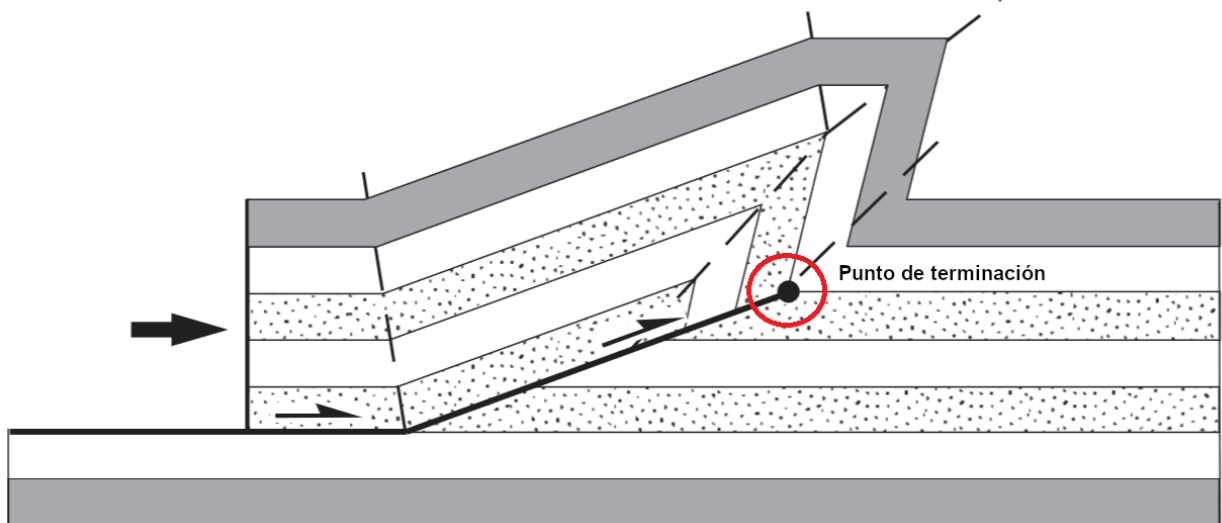


Figura 6. Pliegue por propagación de falla teórica. Las flechas indican la vergencia de la falla y las líneas segmentadas son ejes axiales que separan los bancos de otros bancos que tengan distinta orientación. Modificada de Poblet (2004).

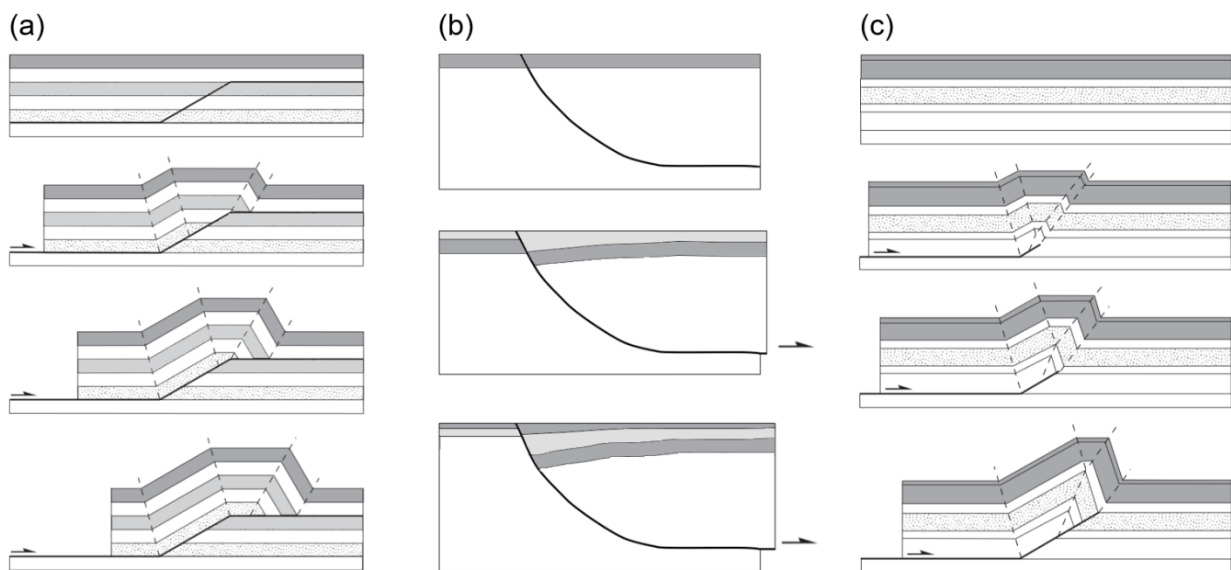


Figura 7. Esquema con tres modelos cinemáticos de diferentes tipos de pliegues. (a) Evolución cinemática de un pliegue por flexura de falla teórica (b) con longitud, espesor y área constante, a partir de una estructura flat-rampa-flat propuesto por Suppe (1983). (b) Evolución cinemática de un anticlinal de rollover por una falla lítrica, basada en Gibbs, (1983). (c) Evolución cinemática de un pliegue por propagación de falla teórica con longitud, espesor y área de las capas constante desarrollado sobre un cabalgamiento formado por un rellano inferior y una rampa según el modelo propuesto por Suppe & Medwedeff (1990).

2.3 MODELAMIENTO DE CASOS DE ESTUDIO

Como se explica en la sección de 1.4.1 Metodología asociada a los objetivos específicos de esta tesis, cada caso de estudio se construyó utilizando dos modelos: un modelo que representa el estado

inicial y otro modelo que representa el estado deformado. A continuación, se procede a explicar las etapas para crear este último estado.

2.3.1 Descripción de los modelos *forward* aplicados para cada tipo de pliegue

Cada uno de los modelos *forward* fue creado utilizando el módulo de modelamiento cinemático tridimensional del software Move2017. Específicamente se ocupó la sección *3D Move-on-Fault*, que es un algoritmo usado para el balanceo y restauración de modelos, el cual se basa en principios cinemáticos que relacionan de manera directa el modelo con la geometría de la falla. Cuenta con tres metodologías que pueden ser usadas tanto en compresión como extensión: cizalle simple (*simple shear*), flujo paralelo a la falla (*fault parallel flow*) y trishear.

A continuación, se da paso a explicar los tres algoritmos utilizados para crear los modelos *forward*. La descripción se obtiene desde la librería del software Move2017.2 y a partir de algunos artículos tomados de la literatura.

Cizalle Simple: Algoritmo de modelamiento geométrico que relaciona la geometría de la falla con las características de deformación del bloque colgante. Este algoritmo es más aplicable a regímenes tectónicos extensionales donde anticlinales de *rollover* se han desarrollado en fallas no planar. Sin embargo, se lo puede utilizar en el modelamiento de cuencas invertidas y crecimiento de fallas, donde el espesor de las capas puede variar. Este algoritmo usado por Move mantiene el área entre las capas.

La deformación de la pared colgante se modela moviendo cada punto en la pared colgante con un movimiento paralelo a la falla y de una misma distancia horizontal (*heave*). La distancia entre cada punto en la superficie de la pared colgante puede considerarse como un marcador, que no cambia su longitud cuando se mueve sobre la falla.

En la Figura 8 se muestra la evolución de un anticlinal de rollover modelado por cizalle simple. Este algoritmo requiere como parámetros de entrada el *heave* y el vector de cizalle. En este caso de deformación por extensión, se genera un espacio entre el plano de falla y el bloque de la pared colgante. Debido al espacio, se genera un colapso en el plano de falla, el cual es controlado por el vector de cizalle, que especifica la trayectoria que toman los elementos de la pared durante el colapso. El vector de cizalle puede estar orientado verticalmente o ser sintético o antitético al plano de falla. El cizalle simple asume que la deformación se produce dentro de la pared colgante a lo largo de una serie de ejes paralelos que se trasladan a través del plano de falla por la distancia horizontal. La longitud de los ejes no cambia a lo largo de la deformación; por lo tanto, la topografía del plano de falla se propaga en los estratos de la pared colgante como pliegues.

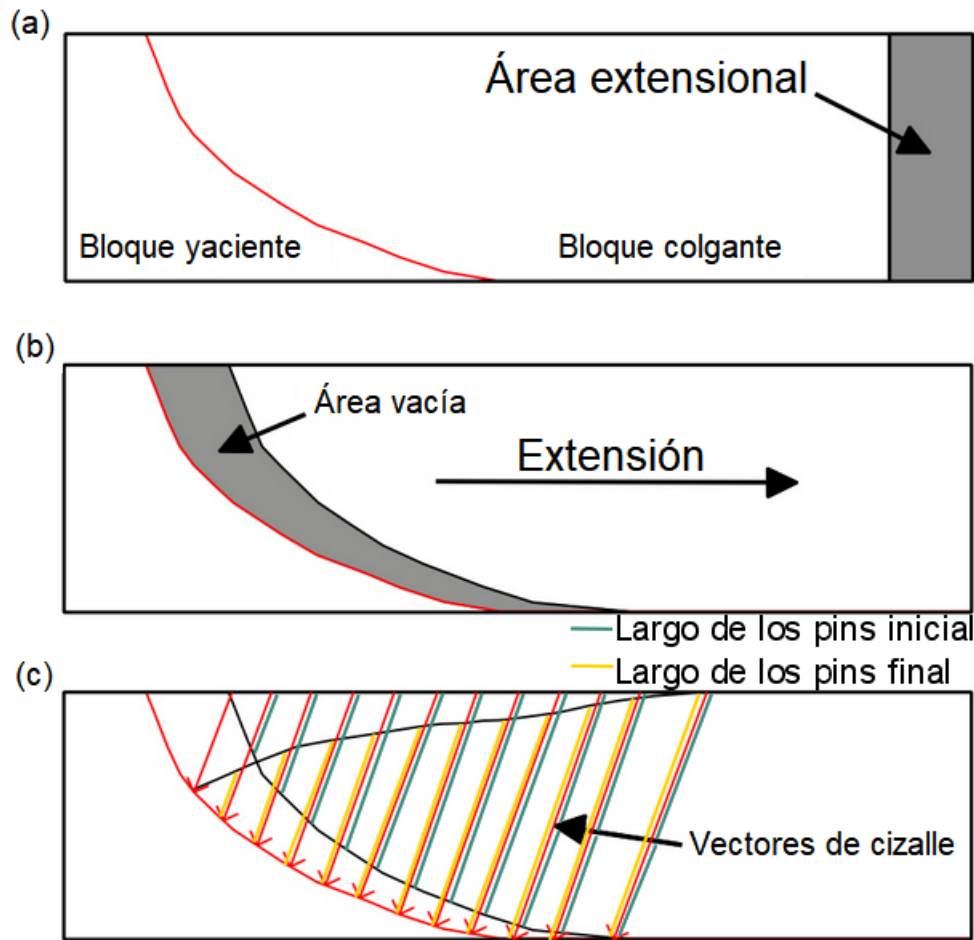


Figura 8. Modelo evolutivo de un anticlinal de rollover. (a) Estado inicial del cuerpo. (b) Se produce la extensión generando un espacio vacío entre el bloque colgante y bloque yaciente. (c) Geometría del anticlinal de *rollover* resultante, en verde el largo de los Pins entre la posición del plano de falla inicial al producirse la extensión (en negro) y el marcador horizontal en el bloque colgante, en amarillo la distancia de los Pins entre el plano de falla (en rojo) y el marcador horizontal en el bloque yaciente una vez generado el anticlinal de *rollover*. Se impone que estas distancias se midan en la dirección de los vectores de cizalle y que sean iguales las distancias para cada tramo. Modificada de la bibliografía de Move2017.

Flujo paralelo a la falla: Este algoritmo se basa en el Flujo Laminar de Partículas sobre una rampa de falla, por lo que se asume que el bloque colgante se comporta como un fluido altamente viscoso (Egan et al., 1997). El algoritmo responde a un modelo cinemático donde la deformación del bloque colgante se acomoda por un cizalle paralelo a la falla, es decir, el desplazamiento es paralelo al plano de falla y en la dirección del movimiento de la falla (Ziesch et al., 2014). El plano de falla se divide en dominios discretos, en los que el cambio de manteo de la falla es marcado con un bisector de manteo. Los flujos de línea son construidos por la conexión de puntos en diferentes bisectores de manteo a una distancia igual al plano de falla y las partículas del bloque colgante se trasladan a lo largo de los flujos de línea, que son paralelas al plano de falla (Figura 9). Este algoritmo tiene como principio conservar el área en el flanco frontal y los largos de líneas, se ajusta mejor para modelamiento de fajas plegadas y corridas donde la mayor deformación ocurre discretamente entre las capas (*flexural slip*), pero también se puede utilizar para el modelamiento de regímenes extensionales.

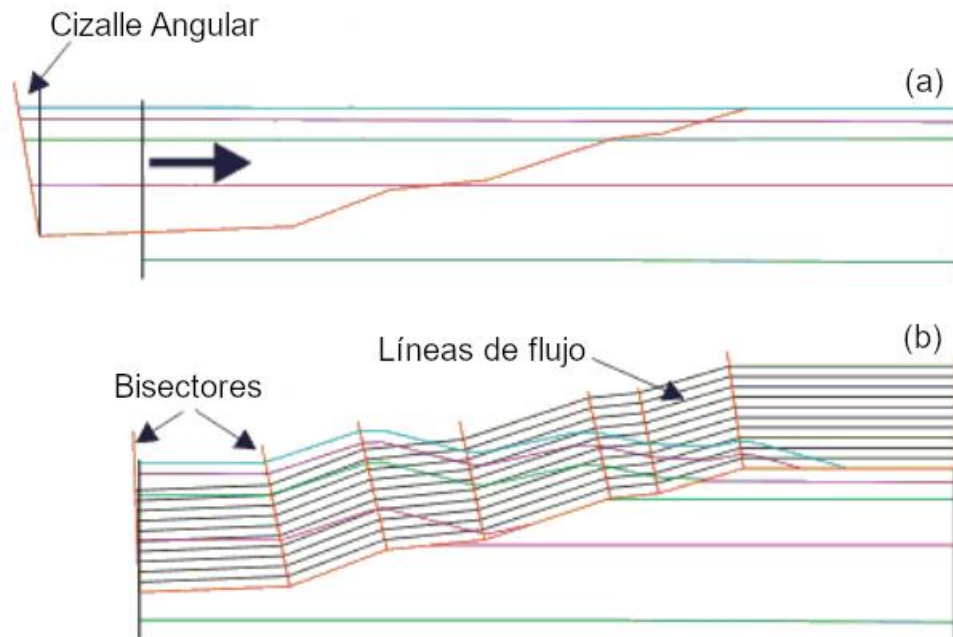


Figura 9. Ejemplo de deformación a partir del algoritmo de flujo paralelo a la falla. (a) Estado inicial del modelo previo a la compresión. (b) Modelo deformado con las líneas de flujo y bisectores marcados.

Trishear: Algoritmo basado en Erslev (1991), desarrollado para modelar estructuras geológicas por deformación de las capas dentro de una zona triangular de cizalle, la cual nace desde el punto de propagación (*tip point* o punto de terminación) de la falla. El trishear fue desarrollado como una alternativa a los modelos de fallas relacionadas a pliegues donde las capas son deformadas dentro de una serie de bandas *kink*, que son zonas de plegamiento tabular que cortan una foliación (estratificación, clivaje o esquistosidad) (Dewey, 1965; Hardy & Ford, 1997), y en su lugar predice geometrías de capas curvas. El algoritmo modela la deformación de manera heterogénea en la zona triangular, donde la magnitud del desplazamiento no es constante y varía desde el máximo ubicado en la parte superior a cero en la base de la zona triangular y la dirección del desplazamiento varía desde paralela a la manteo de la falla en la parte superior a la paralela al ángulo de la base de la zona triangular en la base (Hardy & Ford, 1997) (Véase Figura 10).

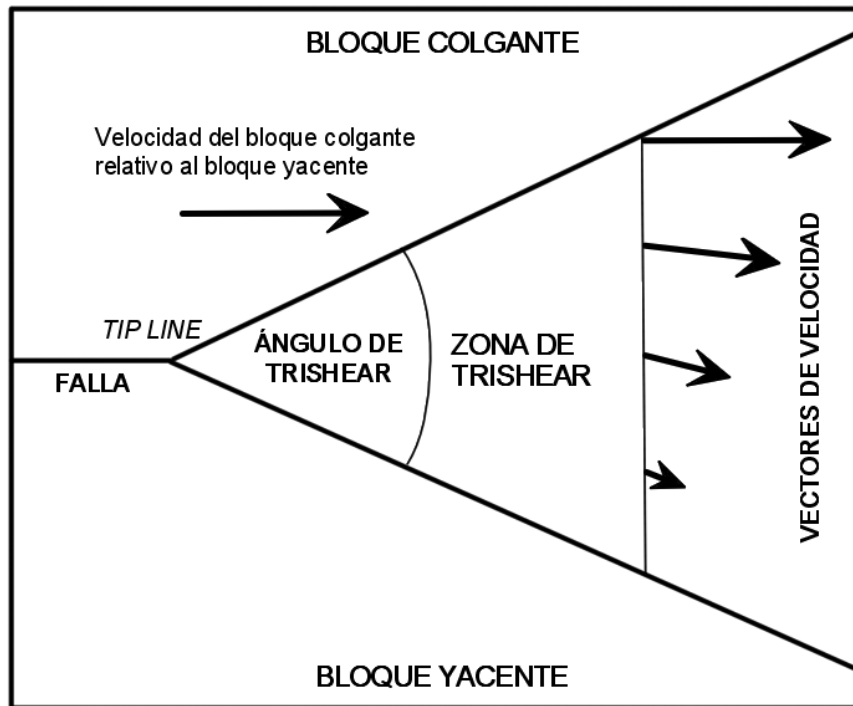


Figura 10. Geometría básica de trishear descrita por Erslev (1991) y Hardy & Ford (1997). Modificada de Allmendinger (1998).

Según el trabajo de Allmendinger (1998), los parámetros que influyen en el modelamiento de estructuras son el ángulo de la rampa, ángulo de trishear, desplazamiento, la relación propagación del tip-point desplazamiento (P/S) y la posición de la punta de la falla (*tip line*). Dentro de estos parámetros la variación de la razón (P/S) influye en la forma de los limbos; por ejemplo, cuando los valores son bajos, resultan limbos delanteros gruesos y pronunciados, y un plegamiento apretado en la zona de trishear. Si P/S es mayor a 1 (Figura 11c), resultan limbos frontales menos gruesos y pliegues formándose en el bloque colgante. Si P/S es grande, el material pasa menos tiempo en la zona de trishear que con (P/S) bajos y en consecuencia hay menos deformación y los pliegues son más abiertos (Figura 11a). Además, al variar el ángulo de trishear influye en la forma del pliegue, si el ángulo es pequeño la deformación es intensa y se concentra en una delgada cuña (Figura 11f); por el contrario, si el ángulo es amplio, la deformación es difusa y la roca se deforma menos (Figura 11d).

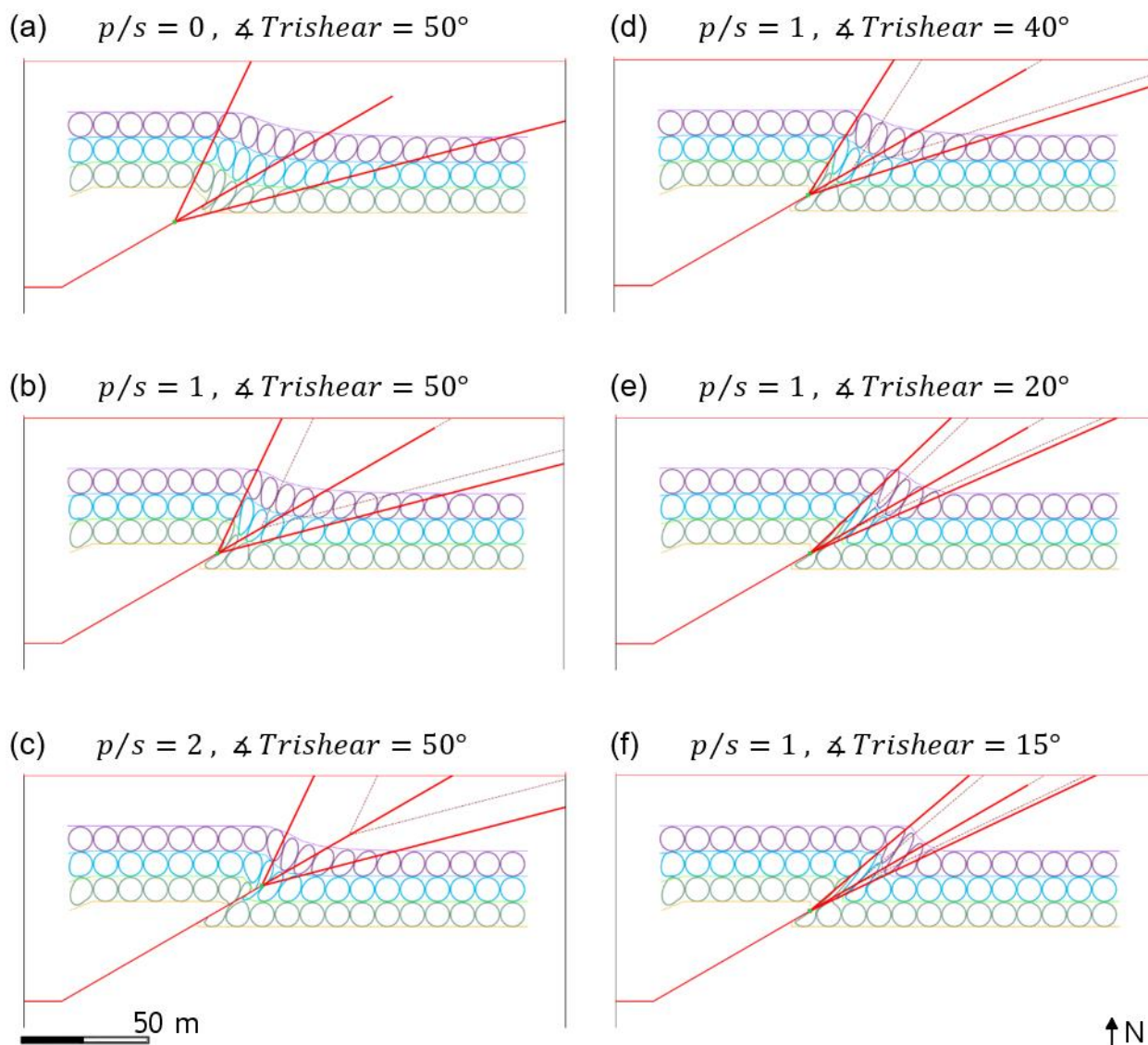


Figura 11. Ejemplos de diferentes configuraciones de los parámetros de tasa de P/S y ángulo de trishear para pliegues de propagación de falla modelados por trishear.

2.3.2 Aplicación de los modelos *forward* para cada tipo de pliegue

2.3.2.1 Pliegues por flexura de falla

Para generar los casos de pliegues por flexura de falla, la geometría de fallas utilizada fue *flat-rampa-flat*, y en algunos casos presentando dos rampas (*flat-rampa-flat-rampa-flat*). Este tipo de pliegue fue modelado a partir de los tres algoritmos con una cantidad pasos igual a 1 y las características utilizadas para cada configuración fueron las siguientes:

Cizalle Simple: Para el movimiento asociado se seleccionó un *heave* (componente horizontal del desplazamiento) constante que se aplicó en todos los puntos a lo largo de la falla activa. Se utilizó un cizalle vertical.

Flujo paralelo a la falla: Para el movimiento asociado se seleccionó un desplazamiento (*slip*) constante que se aplicó en todos los puntos a lo largo de la falla activa. Se utilizó un cizalle vertical.

Trishear: Para el movimiento asociado se seleccionó un desplazamiento constante que se aplicó en todos los puntos a lo largo de la falla activa, con un ángulo de trishear fijo para todos los casos de 50° (ángulo apical entre la parte superior y la base de la zona de Trishear) (Figura 12). En el trabajo de Erslev (1991) se generaron casos con ángulos de trishear entre 40° y 60° , por esta razón se utilizó un ángulo intermedio. Se utilizó una relación $P/S = 0$, esto es la tasa de movimiento entre de la zona de trishear sobre el desplazamiento a lo largo de la falla. Cuando $P/S = 0$ se impone que la propagación de la falla es nula.

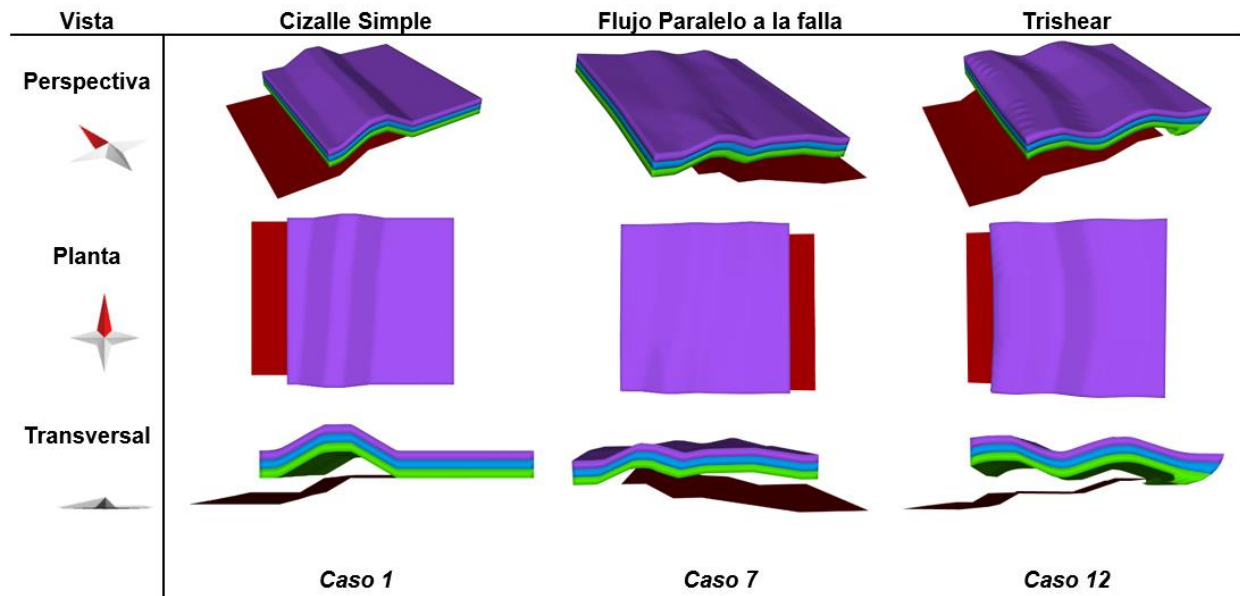


Figura 12. Vista en perspectiva, planta y transversal de distintos pliegues por flexura de falla, específicamente los casos 1, 7 y 12.

2.3.2.2 Anticlinales de rollover

A diferencia de los pliegues por flexura y propagación de falla que tienen el mismo modelo inicial, los modelos iniciales de estos anticlinales varían en su forma según la geometría de la falla lítrica. Este tipo de pliegue fue modelado a partir de los tres algoritmos y con una cantidad pasos igual a 1, las características utilizadas para cada configuración fueron las siguientes:

Cizalle Simple: Para el movimiento asociado se seleccionó un *heave* constante que se aplicó en todos los puntos a lo largo de la falla activa. Se utilizó un cizalle vertical.

Flujo paralelo a la falla: Para el movimiento asociado se seleccionó un desplazamiento constante que se aplicó en todos los puntos a lo largo de la falla activa. Se utilizó un cizalle vertical.

Trishear: Para el movimiento asociado se seleccionó un desplazamiento constante que se aplicó en todos los puntos a lo largo de la falla activa. Un ángulo de trishear de 50° , una relación P/S de 0. El plano de transporte es la dirección de movimiento y la inclinación a través de la cual el material es deformado, varía de caso en caso. En la Figura 13 se ejemplifica un caso de cada tipo de anticlinal de rollover.

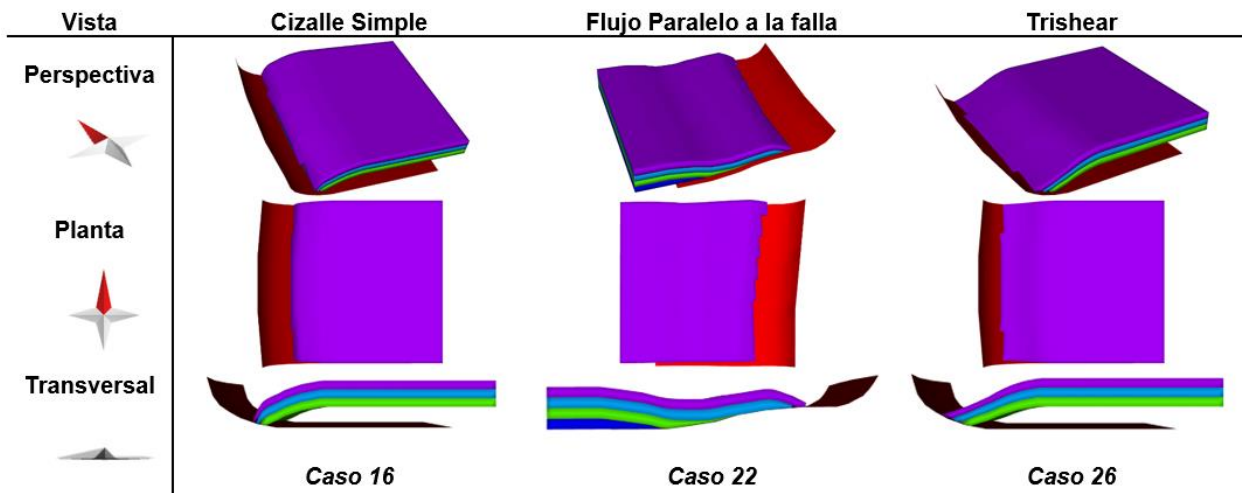


Figura 13 Vista en perspectiva, planta y transversal de distintos anticlinales de *rollover*, específicamente los casos 16, 22 y 26.

2.3.2.3 Pliegues de propagación de falla

Los pliegues de propagación de falla se crearon a partir de una o dos fallas estilo *flat-rampa*, con ángulos de manteo de la rampa menores a 60° .

Este tipo de pliegue fue modelado a partir de los tres algoritmos y con una cantidad pasos igual a 1, las características utilizadas para cada configuración fueron las siguientes:

Cizalle Simple: Para el movimiento asociado se seleccionó un *heave*, para así obtener la geometría asimétrica de los pliegues de propagación de falla, con un flanco más inclinado que el otro. Se utilizó un cizalle vertical.

Flujo paralelo a la falla: Para el movimiento asociado se seleccionó un desplazamiento variable, para así obtener la geometría asimétrica de los pliegues de propagación de falla, con un flanco más inclinado que el otro. Se utilizó un cizalle vertical.

Trishear: Para el movimiento asociado se seleccionó un desplazamiento (*slip*) constante que se aplicó en todos los puntos a lo largo de la falla activa. El ángulo de trishear varió dependiendo del caso (entre 30° y 50°), al igual que la relación P/S . En la Figura 14 se ejemplifica un caso de cada tipo de pliegue por propagación de falla.

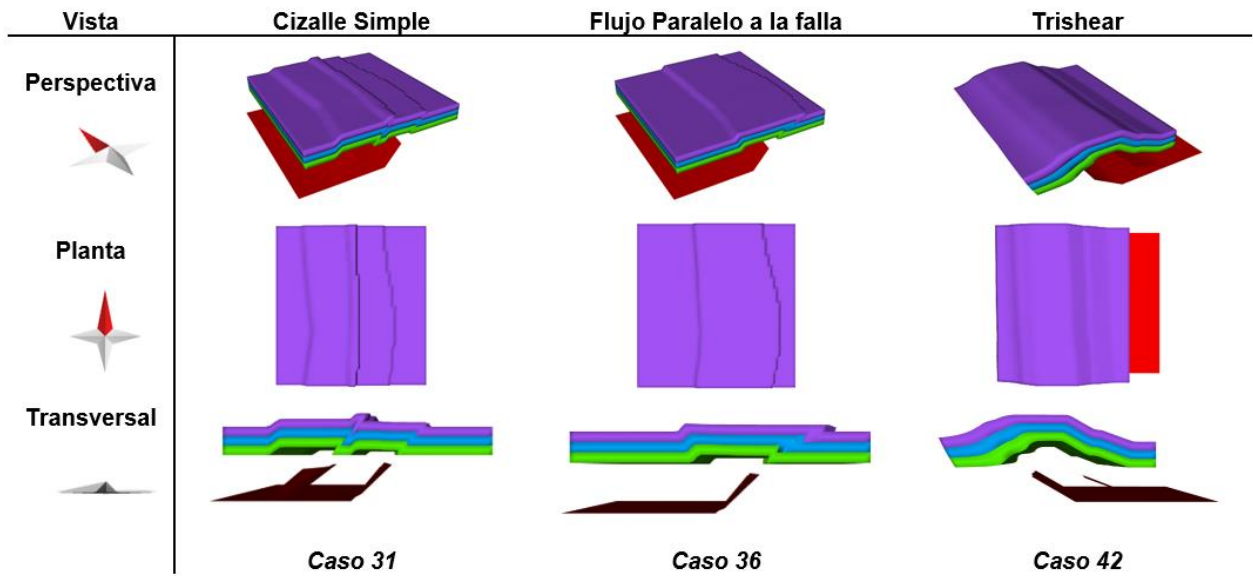


Figura 14. Vista en perspectiva, planta y transversal de distintos pliegues por propagación de falla, específicamente los casos 31, 36 y 42.

Para cada caso varían los parámetros, como por ejemplo el plano de transporte es la dirección de movimiento y la inclinación a través de la cual el material se deforma.

Una vez generado cada uno de los casos, estos modelos de bloques se visualizan en el software U-Fo como nube de puntos tridimensionales. En la Figura 15, Figura 16 y Figura 17 se muestra un ejemplo representativo de los tres tipos de pliegue con sus dimensiones respectivas.

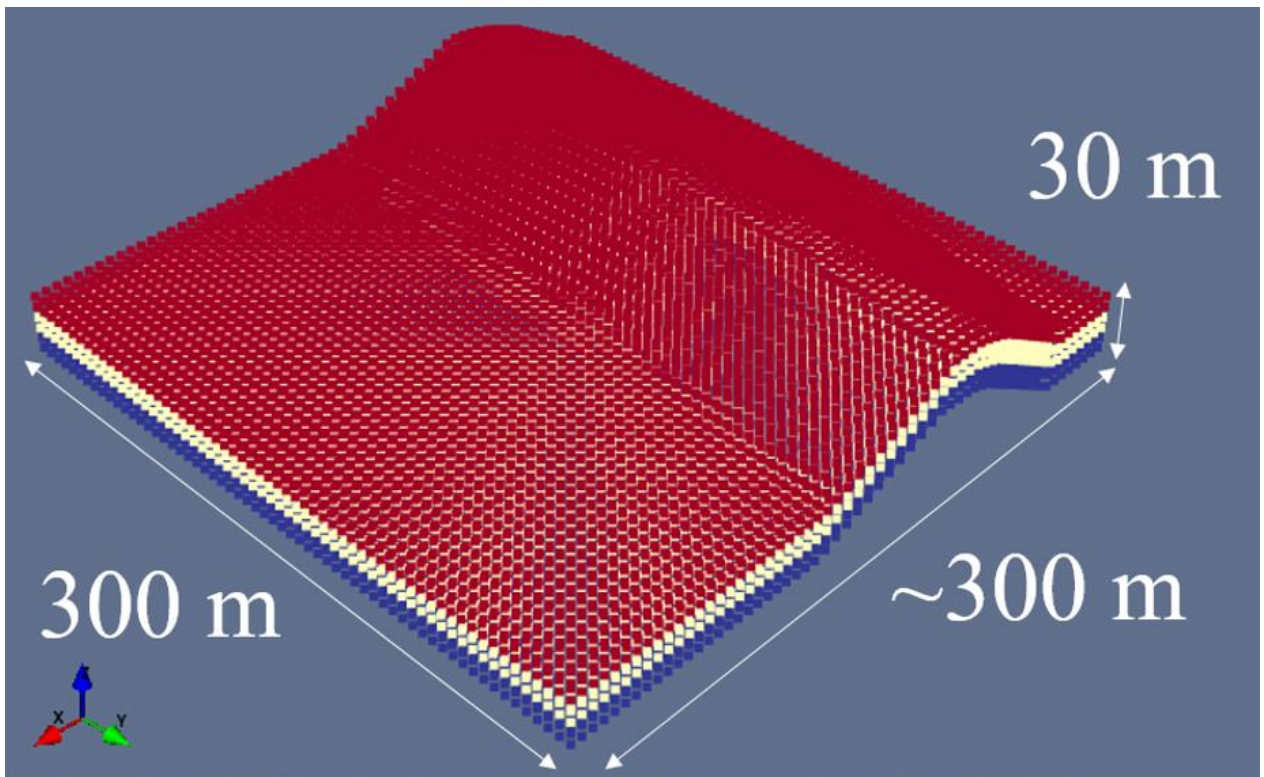


Figura 15. Pliegue por flexura de falla modelado por el algoritmo de flujo paralelo a la falla.

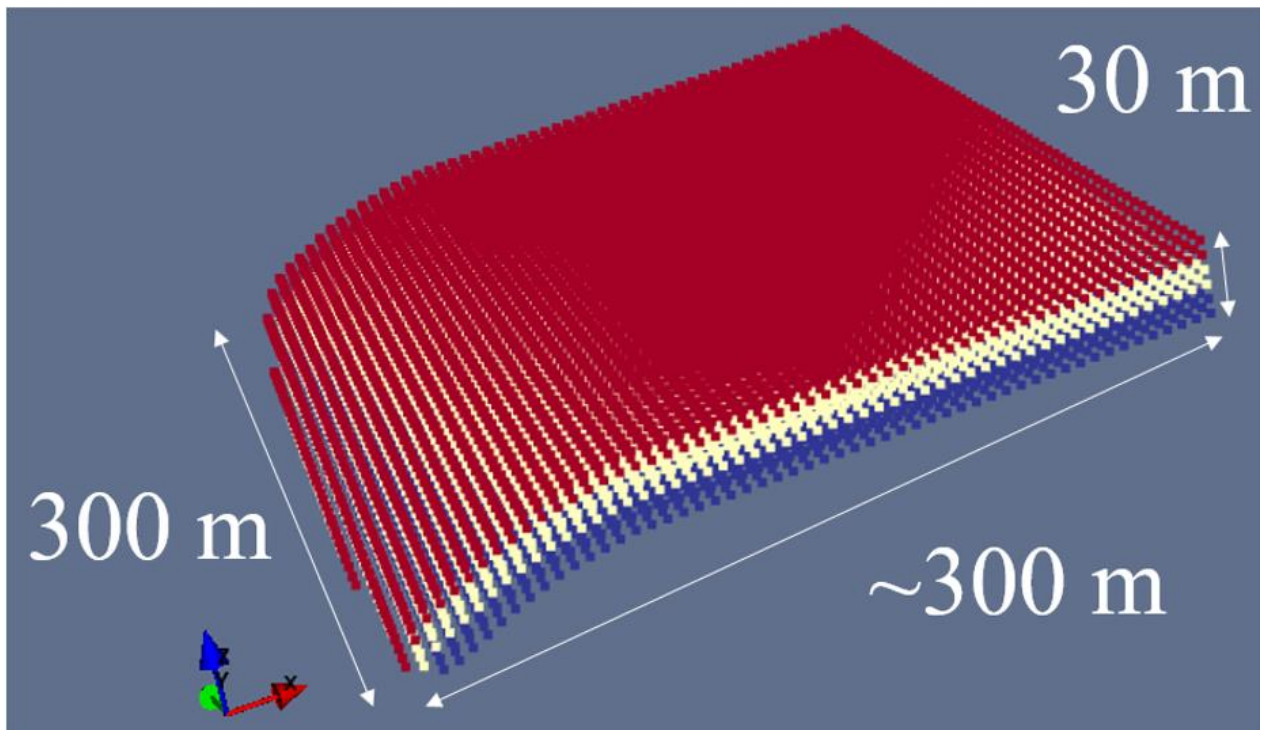


Figura 16. Anticlinal de *rollover* modelado por el algoritmo cizalle simple.

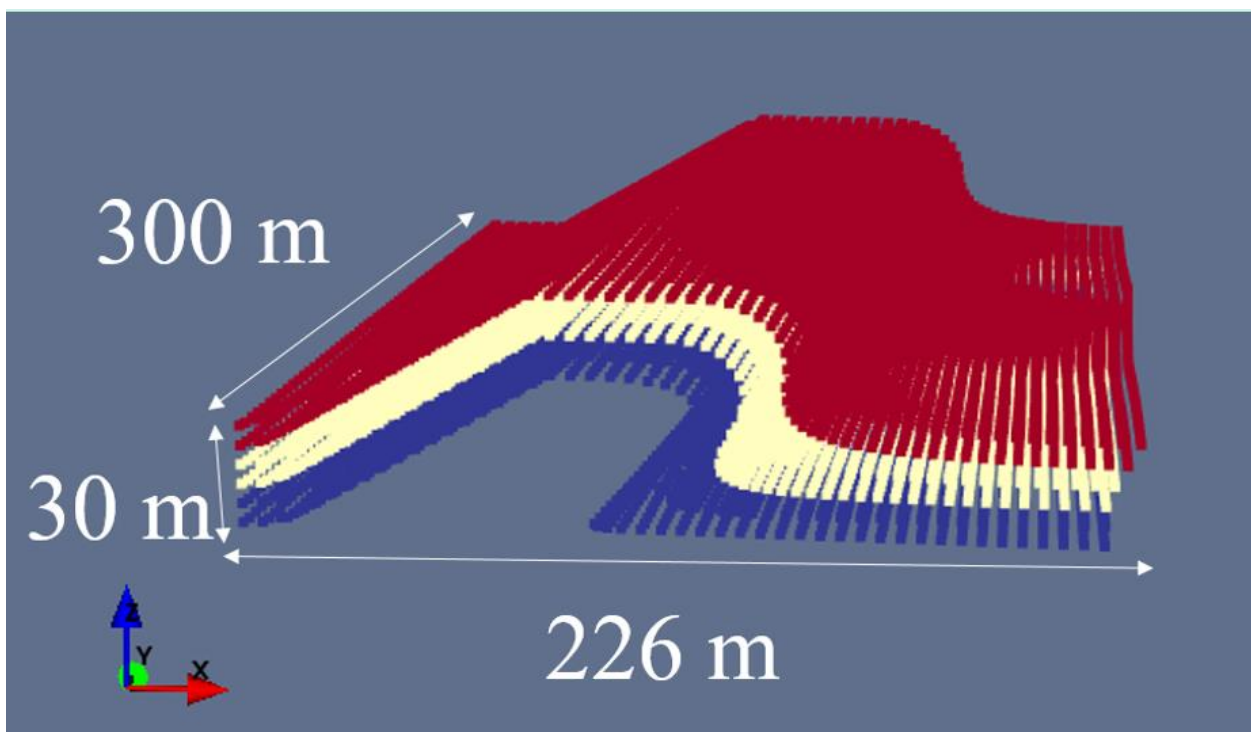


Figura 17. Pliegue por propagación de falla modelado por el algoritmo de trishear.

La descripción de los parámetros de cada caso esta detallada en el ANEXO A.

2.3.2.4 Discusión de casos de estudio: Limitantes de los modelos

Una de las primeras limitantes observadas es que, al ser casos sintéticos, se produce un sesgo asociado a la metodología de deformación, ya que algunos principios no se conservan al deformar el modelo, por ejemplo, los largos de línea. En la Figura 18 se muestra un ejemplo de secciones transversales de distintos casos modelados por cada modelo de deformación, donde se evidencia la variación del largo de línea entre el modelo inicial y el deformado.

Para los casos de pliegues por flexura, se logró obtener las características típicas de este tipo de pliegue con las metodologías de cizalle simple y flujo paralelo a la falla. En los casos modelados por trishear no se obtuvo la forma deseada, esto se debe a que el flanco frontal del pliegue se vio afectado por la zona de trishear. La razón por la que esto se produjo es debido a que se utilizó un valor de 0 para la razón P/S, en consecuencia, a partir del *tipline* de la falla nace la zona triangular, la cual entra en contacto con las capas desplazadas del bloque colgante. La razón por la cual se optó que esta razón fuera nula, es debido a que en estos tipos de pliegue no hay propagación de falla y el pliegue se genera una vez que la falla ya está generada y no de manera simultánea. Pero, en pos de obtener una geometría acorde a los pliegues por flexura, en el caso de modelo por trishear se debería usar una razón P/S alta con la condición de la que la propagación sea tal que la zona triangular no entre en contacto con las capas desplazadas del bloque colgante.

Para la categoría de los anticlinales de *rollover*, los tres algoritmos dieron resultados coherentes con las geometrías esperadas, pero no se conservaron los espesores y los largos de línea.

Para el caso de los pliegues por propagación, el mejor algoritmo fue el de trishear, ya que genera el pliegue asimétrico con el flanco frontal más inclinado que el dorsal. Además, da la libertad de

variar parámetros como el ángulo de trishear y la razón P/S, lo que permite resultados más variados para usar en el análisis. Los casos de este estilo de pliegue que fueron modelados por cizalle simple o flujo paralelo a la falla, la deformación de generó como si las capas hubieran sido cortadas por una falla y posterior mente alzadas. Cabe resaltar que por el estilo de deformación de trishear los espesores no se conservan en la zona triangular, que es donde se concentra la deformación.

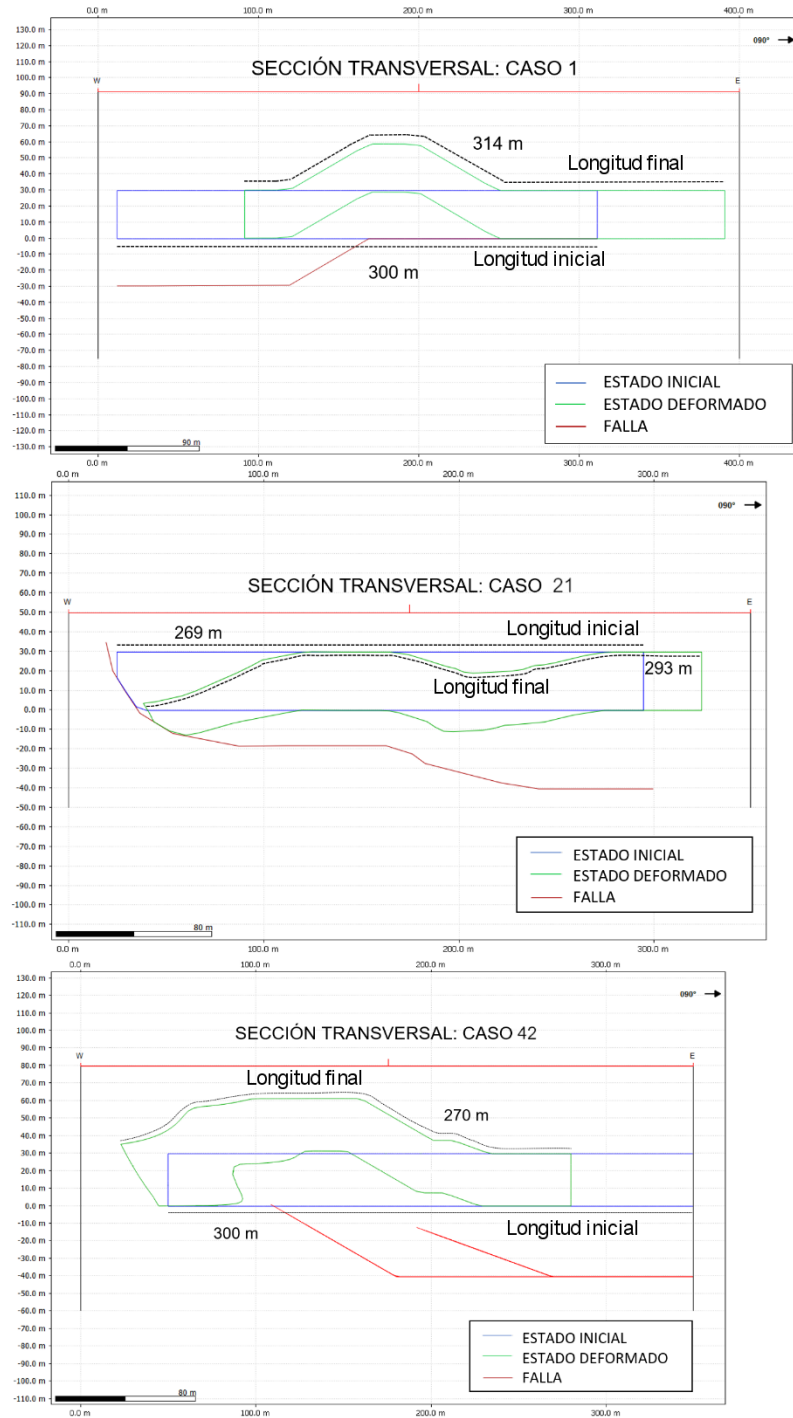


Figura 18. Distintas secciones de modelos. Caso 1 modelado por cizalle simple, caso 21 modelado por flujo paralelo a la falla, caso 42 modelado por trishear, variaciones de longitud de 4.6%, 8.9% y 10% respectivamente.

CAPÍTULO 3: RESTAURACIÓN USANDO UN SISTEMA DINÁMICO MASA-RESORTE

En el presente capítulo se explicarán las técnicas de restauración comúnmente utilizadas, desde restauración de secciones balanceadas hasta volúmenes para, a continuación, dar paso a explicar la metodología de restauración que fue utilizada y analizada en este trabajo. Esta técnica se basa en *machine learning*, optimización combinatorial y ciencia de datos, la cual es capaz de entregar restauraciones geológicas con un mínimo de interpretaciones entregadas por el experto.

3.1 INTRODUCCIÓN A LAS METODOLOGÍAS DE RESTAURACIÓN

“La habilidad de extraer la historia del movimiento asociado a estructuras geológicas es la llave elemental en la comprensión de procesos de deformación fundamentales” (Rouby et al., 2000, p. 805).

A lo largo de los años se ha visto una evolución de los alcances de las metodologías de restauración, incluyendo análisis en secciones 2D, superficies y volúmenes, aun cuando los mayores esfuerzos han ido tendiendo a comprender los procesos de deformación con un enfoque tridimensional. Esto permite plantear modelos geológicos coherentes, ya que se comprende de mejor manera las relaciones entre los eventos de deformación y sus principales factores, como los son el tipo de estructura, estilos de deformación, tasas de sedimentación, extensión y/o acortamiento.

3.1.1 Secciones balanceadas

Los primeros trabajos asociados a restauración geológica se enfocaron en el trabajo de secciones balanceadas. Una sección estructural es una interpretación geológica en dos dimensiones, la cual muestra la interacción entre capas litológicas y estructuras tectónicas (Figura 19). Para que la sección sea balanceada debe cumplir dos requisitos: ser admisible y viable. Admisible, significa que las estructuras propuestas se pueden observar, ya sea en laderas de cerros, o en cortes de caminos. Que sea viable implica que es posible restaurar la sección a un estado previo a la deformación tanto así que la geometría en el estado restaurado sea coherente y admisible (Dahlstrom, 1969; Elliott, 1983; Marshak & Woodward, 1988). La restauración de una sección implica remover el desplazamiento generado por fallas y aplanar los pliegues. Para validar la restauración los criterios principales son conservación de largo de líneas de las capas y/o áreas. Para ello se compara el estado deformado con el restaurado y se calcula la variación (Dahlstrom, 1969; Marshak & Woodward, 1988).

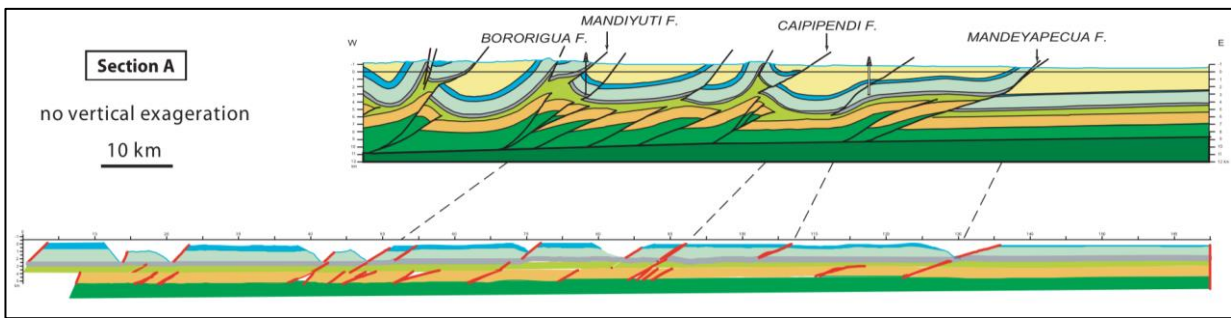


Figura 19. Ejemplo de una sección estructural balanceada y retrodeformada de la zona SubAndina sur de Bolivia. Tomada de Moretti et al. (2007).

3.1.2 Restauración de Superficies

Al igual que en la restauración de secciones, los primeros trabajos enfocados a restauración de superficies se basaron en principios geométricos. A partir de la década de 1970, el desarrollo de la técnica de elementos finitos ha permitido un amplio uso en este dominio, el que a medida que las capacidades computacionales fueron ampliándose, han aumentado la calidad y capacidad de las metodologías de restauración, incorporando nuevos algoritmos que consideran, por ejemplo, el comportamiento mecánico de las rocas.

La técnica de elementos finitos es ampliamente utilizada para restaurar superficies y volúmenes de cuerpos geológicos. Cobbold (1979) la utilizó para remover la deformación finita de un cuerpo deformado, para ello discretizó el cuerpo en una cantidad limitada de elementos de un tamaño finito, los cuales generalmente se representan por triángulos, técnica utilizada por otros autores en trabajos posteriores (Egan et al., 1997; Gratier & Guillier, 1993; Gratier et al., 1991; Moretti, 2008; Moretti et al., 2007; Rouby et al., 2000; Williams et al., 1997), y asumió que la deformación, rotación o traslación rígidas, son constantes para cada elemento pero variables respecto a otro elemento.

Una vez discretizada la superficie se procede a reposicionar un triángulo en primer lugar mediante rotación y traslación hasta que sus tres vértices queden en la horizontal, para luego arreglar los triángulos que tengan dos vértices en común (Gratier et al., 1991). Existen casos de triángulos que se tienen que acomodar en el espacio generados por sus vecinos, produciendo gaps y overlaps. Para minimizar estos espacios se ha utilizado el método de mínimos cuadrados (Cobbold, 1979; Gratier & Guillier, 1993; Gratier et al., 1991).

3.1.3 Restauración de Volúmenes

Las técnicas de restauración han evolucionado con el tiempo y cada vez toman más en cuenta los fenómenos físicos y mecánicos involucrados en la formación de estructuras geológicas. El enfoque clásico de restauración se basó en la ley de conservación de volumen que establece que las características geológicas son restauradas a un estado pre-deformación sin pérdida de volumen del material geológico, de esta manera se mantiene la disposición de los estratos, los largos y los espesores de cada capa (Santi et al., 2002).

En trabajos recientes enfocados a cuerpos en 3D, se ha desarrollado el proceso de *unfolding* basado en el método de elementos finitos y la minimización de tensores elásticos de deformación (Horn et al., 2010; Moretti, 2008; Tang et al., 2017). Además, la motivación de proponer nuevas

metodologías de restauración tiene una fuerte relación con la mejora en la estimación de recursos naturales (Maerten & Maerten, 2006; Poudret et al., 2011).

3.2 SISTEMA DINÁMICO DE MASA-RESORTE

La metodología que se evalúa en este trabajo se basa en un sistema dinámico de Masa-Resorte que se explica en tres etapas principales:

1. Obtención de superficie de referencia
2. Aplanamiento de superficie de referencia
3. Aplanamiento de modelo de bloques

Cada una de las etapas se explica a continuación de manera detallada y se ejemplifica con la restauración de un caso de estudio.

3.2.1 Obtención de Superficie de Referencia

El primer paso consiste en obtener una superficie de referencia (SR) a partir del modelo de bloques. La SR es una superficie capaz de representar la mayor parte del cuerpo que se desea restaurar y tiene gran importancia en el proceso, debido a que el aplanamiento del modelo de bloque (MB) se realiza en función del aplanamiento de esta superficie.

La complejidad de esta etapa recae en que debe responder a la siguiente pregunta considerando que la nube de puntos es la representación del MB: ¿Qué superficie representa de mejor manera una nube de puntos tridimensional ubicada en el espacio?

La opción elegida en el algoritmo del software U-Fo, fue utilizar Análisis de Componentes Principales (PCA, del inglés *Principal Component Analysis*). La razón por la cual se opta por esta metodología es porque es capaz de obtener la superficie que representa de mejor manera una nube tridimensional de puntos; en otras palabras, se trata de obtener la mejor representación en 2D de un conjunto de datos en 3D. De manera general, PCA permite reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos formados a partir de un gran número de variables interrelacionadas, procurando que se conserve lo máximo posible la varianza del conjunto de datos. Para lograr esto, el conjunto de datos se transforma en un nuevo conjunto de variables que se denominan componentes principales (PC), que no están correlacionados, y están ordenados de modo que uno de los PC conserve la mayor parte de la variación presente en toda la variable original (Jolliffe, 2002). La Figura 20 sirve como ejemplo para explicar la metodología, en ella se aprecia un conjunto de datos originales graficados según sus valores en los ejes x e y. A partir del análisis de estos datos se obtienen dos componentes principales (pc), a los cuales se les reasigna un valor en función de la posición de otro sistema de coordenadas, eje verde y rojo de la Figura 20a. Estos dos componentes principales cumplen con la condición de que uno de ellos, en este caso el pc1 (eje rojo) tiene una mayor varianza que el otro componente principal 2 (eje verde), y se puede graficar los valores, usando como ejes el pc1 y pc2 (Figura 20b). Debido a que la variación en uno de los componentes (pc2) no es relevante, es posible representar los datos únicamente utilizando el pc1 (Figura 20c), de esta manera se ha reducido la dimensionalidad de 2D a 1D.

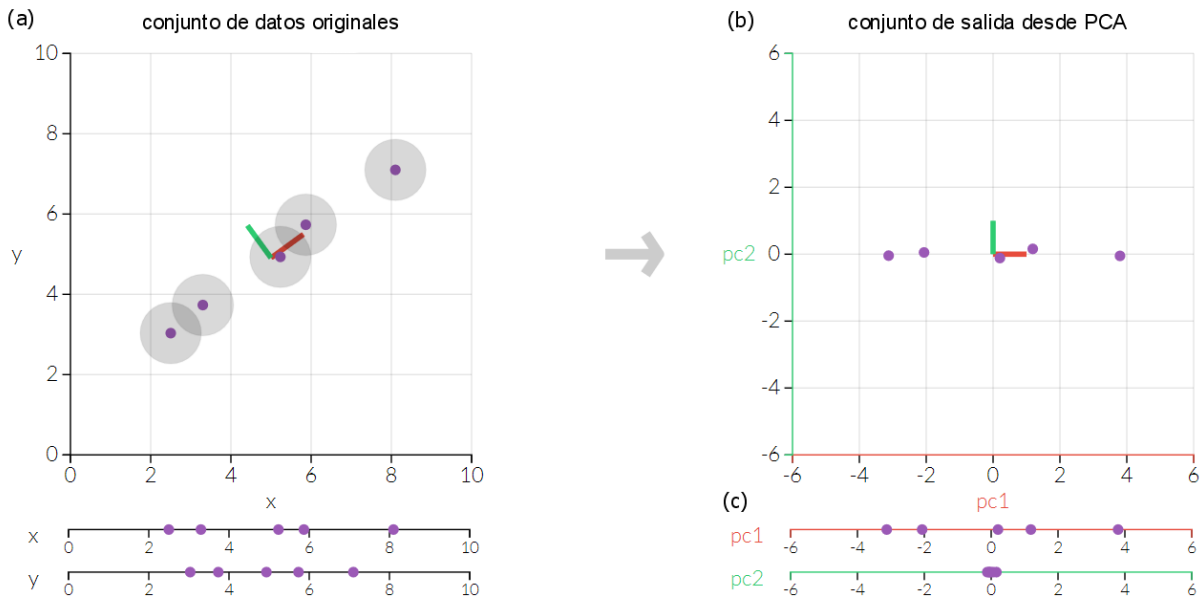


Figura 20. Ejemplo de análisis de componentes principales. (a) Conjunto de datos originales graficados según sus coordenadas del eje x e y. (b) Reposición de los datos en función de los nuevos ejes, pc2 y pc1. (c) Gráficos de los datos unidimensional en función de pc1 y pc2. Modificada de Powell & Lehe (2012).

En el caso particular del algoritmo de restauración, el MB está representado por una nube de puntos tridimensional, por lo tanto, cada uno de los puntos del modelo tiene asociado un valor (x,y,z) (Figura 21a). Con PCA se puede disminuir la dimensionalidad de 3D a 2D y, de esta manera obtener una proyección de los datos tridimensionales en una vista bidimensional, la cual representa a la superficie de referencia. Para el caso tridimensional el concepto es el mismo explicado anteriormente, obtener 3 componentes principales donde 2 maximicen la varianza (pc1 y pc2) y el tercero tenga una varianza menor (pc3) en comparación con los datos graficados según los ejes x,y,z (Figura 21b), de esta manera la vista deseada está formada por los valores reubicados en función de los ejes pc1 y pc2 Figura 21c.

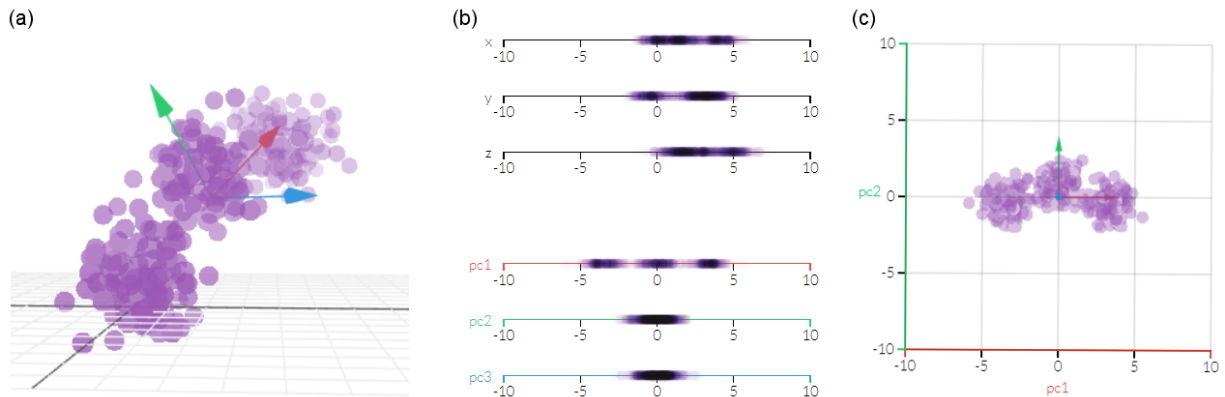


Figura 21. Ejemplo de PCA tridimensional. (a) Nube de puntos tridimensional. (b) Valores graficados según los ejes x,y,z ; pc1,pc2,pc3. (c) Resultados al aplicar PCA, gráfico de los datos según los ejes pc2 y pc1. Modificada de Powell & Lehe (2012).

Una vez obtenida la vista deseada, se seleccionan los puntos que desde esa vista están a mayor altura; para ellos se usa una grilla simple donde el usuario define las dimensiones de esta, y se trabaja como una triangulación de Delaunay. Esta técnica consiste en la subdivisión de un área en triángulos con la condición de que los triángulos sean lo más regular posibles y cada vértice se ubique en un punto de la nube y en cuyo interior no haya ningún punto de la nube (Priego de los Santos & Porres de la Haza, 2002). La Figura 22, es un ejemplo de un modelo representado por una nube de puntos y su respectiva superficie de referencia.

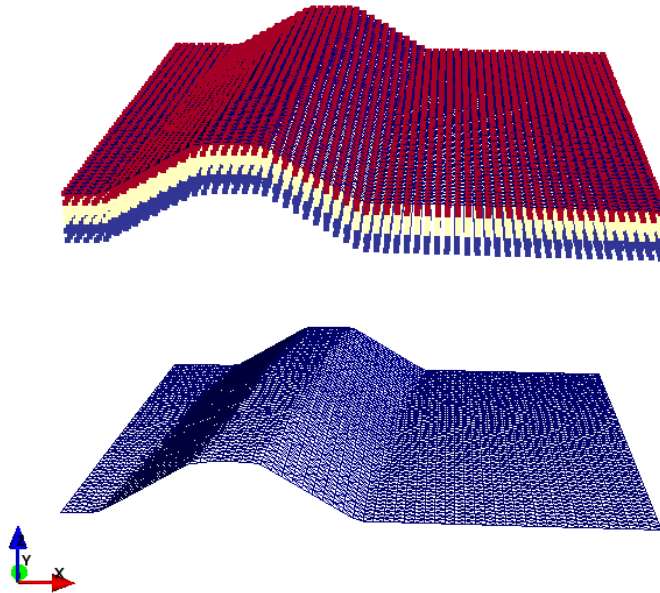


Figura 22. En la parte superior: modelo de bloques con su respectiva superficie de referencia formada por una triangulación de tamaño de grilla de $5 \times 5 \text{ m}^2$. En la parte inferior: superficie del modelo de referencia.

Cabe recalcar la importancia de obtener la superficie de referencia apropiada, debido a que la restauración del cuerpo es en función de la restauración de la superficie de referencia, por ende, si existen errores asociados a la superficie estos se arrastraran al modelo de bloques restaurado.

3.2.2 Aplanamiento de la Superficie de Referencia

El aplanamiento de la superficie de referencia se basa en el trabajo de Wang et al. (2002). Para aplanar la superficie de referencia, ésta se modela como un sistema dinámico Masa-Resorte.

La superficie de referencia es una triangulación formada por vértices y aristas, que se representan por masas y resortes, respectivamente. Esta superficie se considera un sistema en equilibrio, cuya energía varía al pasar de un modelo 3D a una superficie plana 2D. Esta energía se produce a partir de la deformación elástica de la superficie que se calcula en función de la diferencia de posición de la superficie y la forma final en 2D. Si las distancias entre los nodos de la superficie plana son mayores que la distancia correspondiente en la superficie inicial, se aplica una fuerza de compresión entre ellas, de manera contraria se repelerán, como se ejemplifica en la Figura 23.

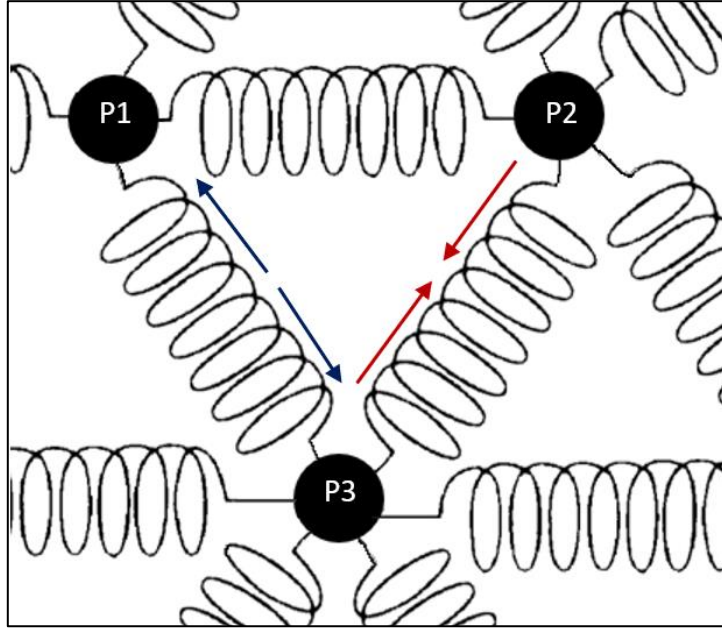


Figura 23. Sistema masa-resorte. P_1 , P_2 , P_3 , representan masa y las conexiones entre las masas, resortes. Durante la deformación, la distancia entre P_1 y P_3 en la superficie plana es menor a la distancia correspondiente en la superficie inicial por lo que se repelen. Entre P_2 y P_3 ocurre el caso contrario.

La mayoría de los parámetros físicos del sistema masa-resorte se derivan de sus correspondientes parámetros geométricos. Por ejemplo, fuerzas, energía de deformación elástica entre nodos de la superficie y masas son determinados por el desplazamiento relativo entre nodos de superficie y el área de triángulos. La función de energía elástica de deformación y la fuerza de tensión en una sola masa (P_i) se definen como:

$$E(P_i) = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} C (|P_i P_j| - d_j)^2$$

$$\vec{f}(P_i) = \sum_{j=1}^n C (|P_i P_j| - d_j) \vec{n}_{p_i p_j},$$

donde C es la constante elástica del resorte, $|P_i P_j|$ es la distancia entre los nodos P_i y P_j en la superficie plana, d_j es la distancia actual entre los nodos respectivos en la superficie espacial, $\vec{n}_{p_i p_j}$ es el vector unitario que apunta desde P_i a P_j , y n es el número de nodos conectados con P_i . Las fuerzas son generadas por las diferencias de los límites de los triángulos entre la superficie plana y la superficie espacial dada. En la Figura 24 se explica con un modelo en 2D el cambio de forma y de posición de los resortes y masas, respectivamente.

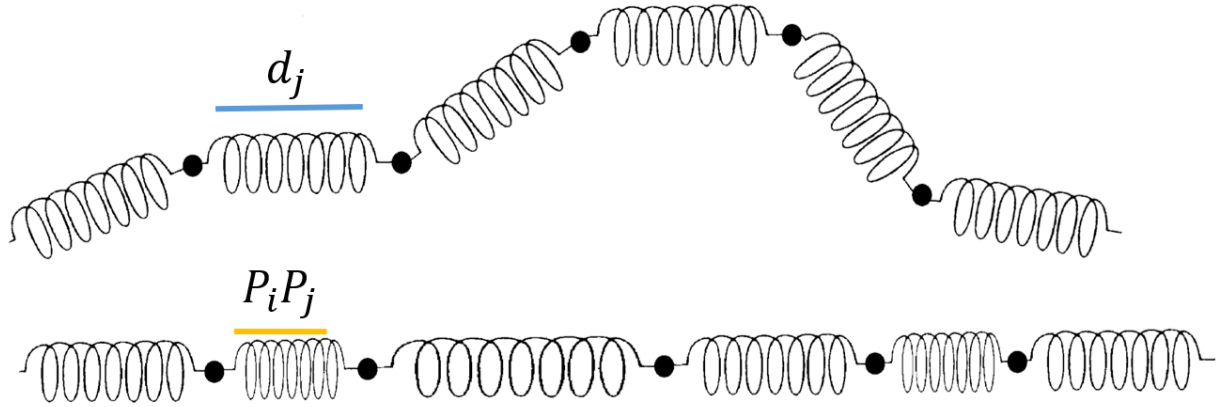


Figura 24. Esquema en 2D de la variación de los resortes. En la parte superior, modelos la superficie original. Parte inferior, modelo de la superficie aplanada.

La masa de los nodos se expresa como la suma de los k triángulos que interceptan el nodo i como vértice, la ecuación de masa para cada nodo i es la siguiente:

$$m_i = \frac{\rho}{3} \sum A_k$$

Donde A_k es el área del triángulo k en la superficie original y ρ es el parámetro de normalización que en este caso es $\rho = 1/\min\{m_i\}$. Finalmente, la ecuación Lagrangiana para este modelo se puede simplificar como:

$$m_i \ddot{q}(t) = \vec{f}(t)$$

Después de hacer los cálculos de energía y fuerza para cada nodo, la velocidad del i ésimo nodo en el tiempo $t + \Delta t$ se puede expresar por:

$$\dot{q}_i(t + \Delta t) = \dot{q}_i(t) + \Delta t \ddot{q}_i(t)$$

Y la posición:

$$q_i(t + \Delta t) = q_i(t) + \Delta t \dot{q}_i(t) + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{q}_i(t)$$

Para asegurar una aceleración constante Δt tiene que ser muy pequeño, en este caso 0.001.

Criterio de detención

Wang et al. (2002), sugiere finalizar con la simulación cuando la energía mínima del sistema masa-resorte es alcanzada. Esto significa que el problema de optimización se puede expresar como:

$$\min E(\phi)$$

Donde $E(\phi)$ es la energía elástica de todo el sistema,

$$E(\phi) = \sum_{i=1}^m E(P_i)$$

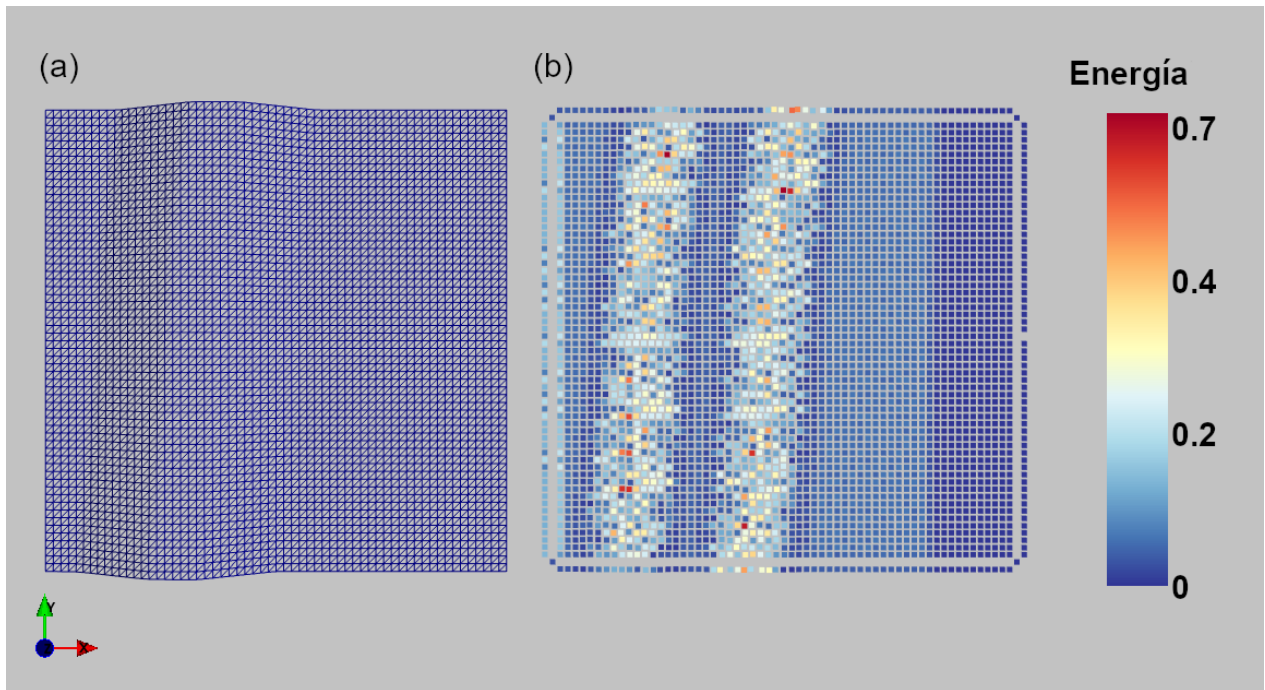


Figura 25. (a) Vista en planta de una superficie de referencia de un modelo deformado. (b) Vista en planta de la superficie de referencia restaurada con la energía final de cada nodo.

Dentro de la metodología, el usuario puede separar la superficie de referencia en dominios, uno que ya está plano (zona roja Figura 26) y no requiere aplanarse y otro donde se concentra la deformación (zona azul Figura 26). Esta separación impone que los resortes ubicados en el dominio plano no variarán su largo.

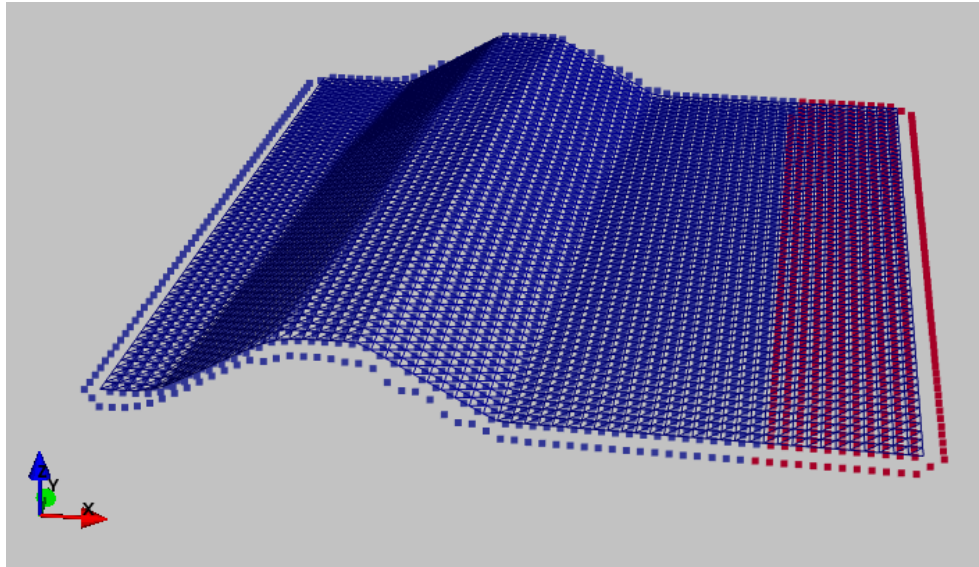


Figura 26. Superficie de referencia separada en dos dominios. Dominio azul: donde se concentra la deformación. Dominio rojo: parte de la superficie plana que no requiere restauración.

3.2.3 Aplanamiento del Modelo de Bloques

El aplanamiento del volumen, representado por el modelo de bloques (MB), se realiza en función del aplanamiento de la superficie de referencia. Cada bloque del modelo es asociado a un triángulo de la SR, esta asociación se produce interceptando cada bloque con algún triángulo de la SR. Desde el centroide de cada bloque se realiza la proyección de un rayo en la vertical hasta interceptar un triángulo de la SR (Figura 27a). Cuando se produce la intersección se calcula la distancia entre el centroide del bloque y el triángulo. Para obtener la nueva posición de los bloques se impone que la distancia obtenida para cada bloque se mantenga una vez aplanada la superficie, es decir, después que los triángulos se trasladen, roten y/o escalen (Figura 27).

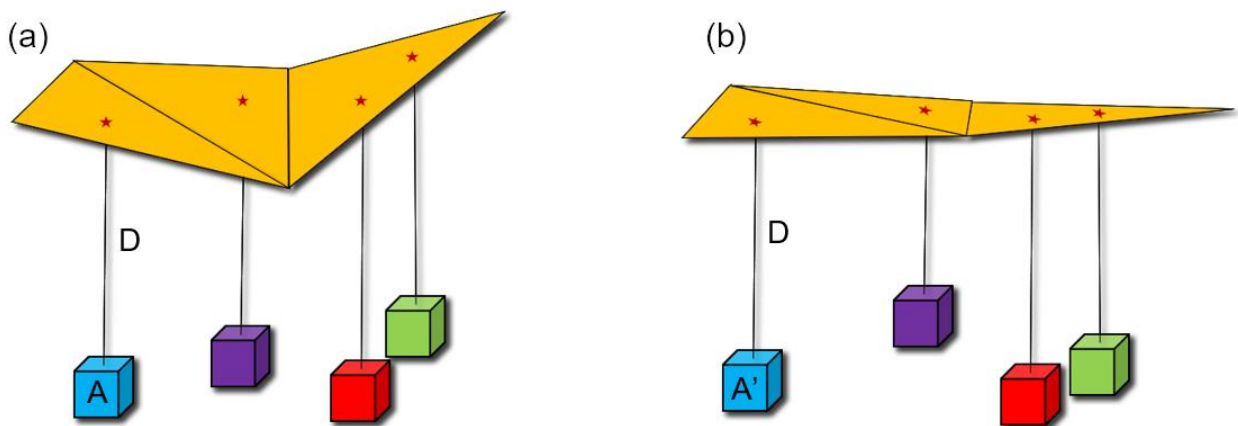


Figura 27. (a) Esquema de *raytracing*. Proyección desde los bloques hasta intersectar un triángulo de la superficie de referencia en el estado deformado. (b) Bloques desplazados en función de la restauración de los triángulos de la SR, con la condición de que se conserve la distancia.

Una vez restaurados todos los casos sintéticos se procede a utilizar las métricas propuestas que se detallan en el CAPÍTULO 4:.

CAPÍTULO 4: MÉTRICAS DE VALIDACIÓN DE RESTAURACIÓN

Unos de los objetivos principales de este trabajo de tesis es el de proponer métricas que sean capaces de cuantificar restauraciones geológicas tridimensionales. En este capítulo se detalla las métricas creadas y se dan a conocer los principales resultados.

La manera de realizar la medición es comparar el estado restaurado con el inicial, tal como fue explicado en el CAPÍTULO 1:. Debido a que el modelo de bloques se visualiza como puntos ubicados en el centroide de cada bloque que conforma el modelo, lo que se desea cuantificar es cuan parecidas son dos nubes de puntos tridimensionales.

En este trabajo se propone una métrica que es capaz de cuantificar y entregar un índice de restauración. A continuación se detalla en que consiste la métrica y el proceso para generarla.

4.1 MÉTRICA DE VECTOR TRASLACIÓN

La primera idea para generar una métrica fue comparar las posiciones de cada bloque del modelo restaurado (MR) con las posiciones de los bloques respectivos del modelo inicial (MI). La comparación se realiza calculando la distancia euclideana entre las posiciones de los bloques. Para poder realizar la medición, se tiene que trasladar el MR debido a que la métrica de restauración de U-Fo restaura la deformación asociada al pliegue en el modelo deformado (MD), pero no considera la traslación generada durante la deformación del modelo. En la Figura 28 se aprecia que existe un desplazamiento asociado a la deformación al comparar MI con MD, y que la restauración solo despliega el MD y no lo traslada.

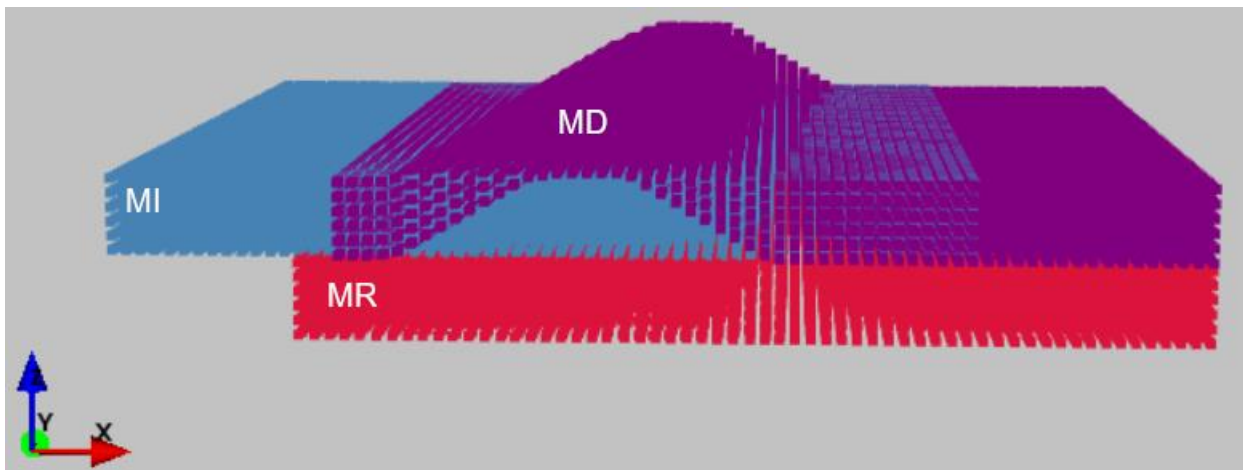


Figura 28. Esquema que muestra las posiciones del modelo inicial (MI) en azul, modelo deformado (MD) en morado y modelo restaurado (MR) en rojo de un caso de estudio.

Como respuesta a esta característica intrínseca del método de restauración, se opta por realizar una traslación, lo que genera la siguiente interrogante: ¿Cuál es el vector de traslación que se debe usar? Para obtener este vector, se optó por trabajar de manera empírica: se seleccionaron tres vectores de traslación y se observó la coherencia entre los resultados de restauración y la geometría del modelo

deformado. Los vectores fueron escogidos en función de tres puntos del modelo: el punto inicial, final y el centroide del modelo de bloques.

Cada bloque del modelo tiene asignado un índice correlativo que va desde 1 hasta el número total de bloques. Estos números se asignan de manera ordenada, partiendo en una de la esquinas inferiores con valores menores en los ejes x,y,z , mientras que en la esquina superior opuesta se ubican los mayores valores de x,y,z , lo cual es establecido en el modelo inicial. El punto inicial se asocia al bloque de índice correlativo 1, el bloque final al de número mayor, y centroide al punto correspondiente ubicado espacialmente en el centroide del modelo. En la Figura 29 se observa como varía el resultado de medición de la restauración del caso 1, en función del vector de traslación utilizado.

La variación de los resultados es notoria y depende fuertemente del vector de traslación. Si el vector de traslación es respecto al punto inicial, las menores variaciones se concentran cercanas a esta zona, mientras que ocurre de manera inversa cuando el vector de traslación es respecto al punto final. Asimismo, cuando el vector de traslación es relativo a los centroides, las menores variaciones son proporcionales a la distancia al centroide. Por esta razón, se optó por promediar las variaciones asociadas a cada bloque para obtener la variación final. En la parte inferior de la Figura 29 se observa el resultado del modelo deformado y el respectivo modelo restaurado. En este caso las menores variaciones se presentan en los bloques que se ubicaron en la charnela del pliegue del modelo deformado, en cambio, en el caso 8 (Figura 30) ocurre de manera inversa.

Por lo tanto, a pesar de que existe una conexión de los resultados al aplicar la métrica con la forma del modelo deformado (i.e., las mayores o menores variaciones se ubican en los bloques donde se generó el pliegue), no existe una coherencia en los resultados por esta misma ambigüedad.

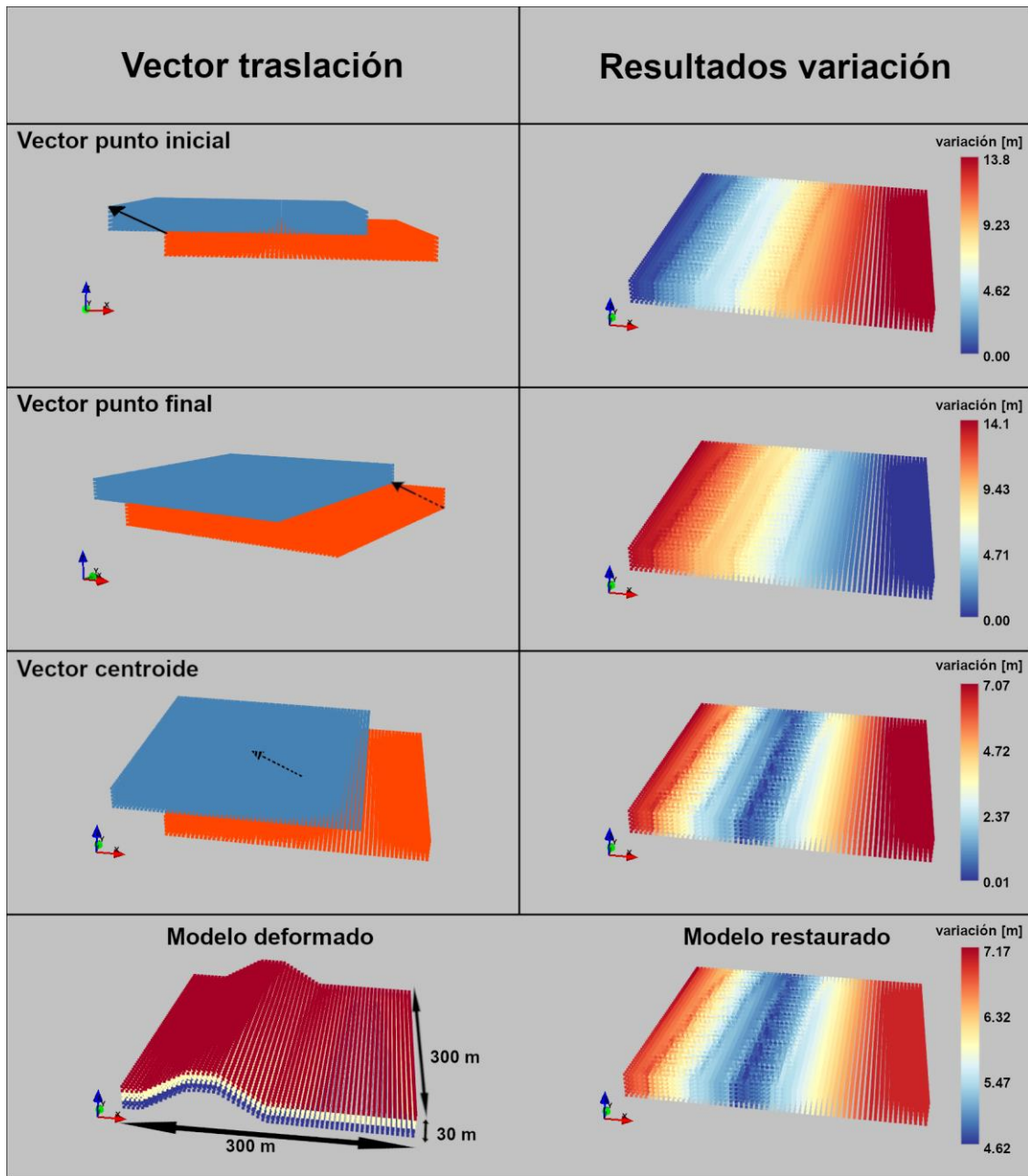


Figura 29. Resultados de métrica de Vector de Traslación para el caso 1. En la columna de “Vector traslación” se muestran los tres vectores de traslación, respecto al punto inicial, final y centroide; en azul el modelo inicial y en naranja el modelo restaurado. En la columna “Resultados variación”, se muestran los resultados de restauración al aplicar la métrica Vector de Traslación. En la parte inferior se muestra el modelo deformado y el restaurado con los valores de variación finales.

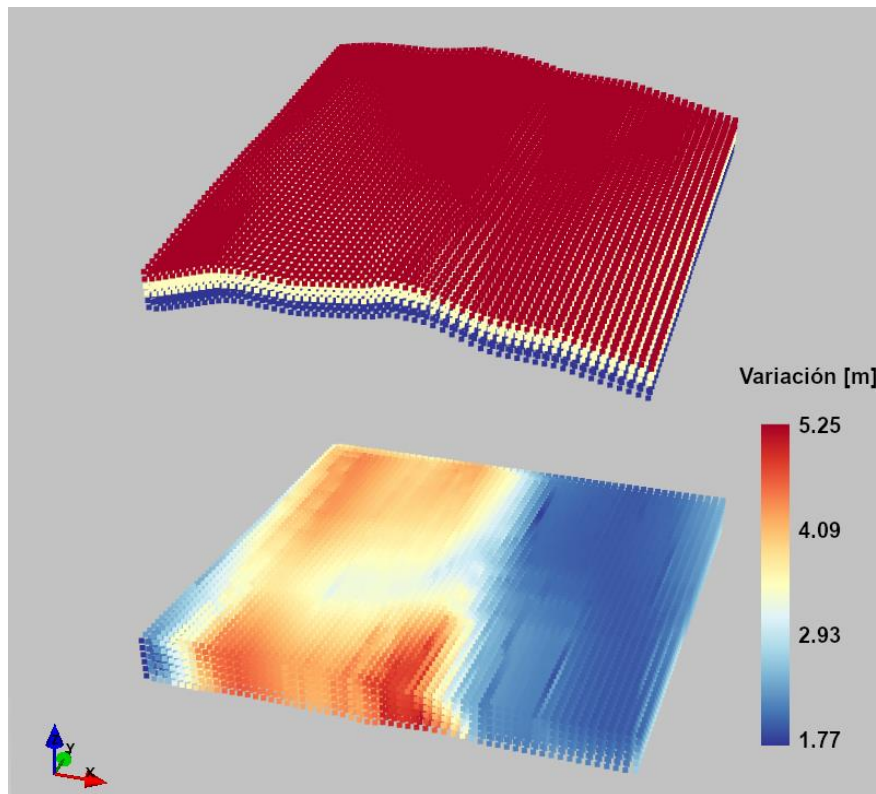


Figura 30. Caso 8 restaurado y aplicado la métrica de Vector de Traslación. En la parte superior el modelo deformado y en la inferior el modelo restaurado.

4.2 MÉTRICA DE VECINOS MÁS CERCANOS

Considerando los resultados de la métrica anterior, se optó por generar una nueva métrica que fuera independiente del sistema de coordenadas. Esta métrica, al igual que la anterior, utiliza casos de estudio sintéticos y compara el modelo inicial con el restaurado (Figura 1).

La métrica se programó en Python 2.7, y se utilizó la librería de *scikit-learn* versión 0.11-git (Pedregosa et al., 2011). La métrica mide la similitud de la distribución espacial de puntos en un vecindario para dos casos, estado inicial y estado restaurado.

4.2.1 Etapas de la Métrica de Vecinos más Cercanos

La métrica se aplica a cada bloque del MR y se subdivide en 4 etapas:

1. Obtención del vecindario cercano del MI
2. Cálculo de distancias en el MR
3. Obtención de la variación de distancias MI vs MR
4. Cálculo de índice

4.2.1.1 Obtención del vecindario cercano del MI

Para cada bloque del MI, que denominaremos “bloque medido inicial”, se obtienen los números de los bloques más cercanos para un vecindario dado y, las distancias euclidianas entre estos bloques

y el “bloque medido inicial”. Estas distancias se guardan en una matriz denominada “matriz distancia inicial”. La explicación de cómo se numeran los bloques está detallado en la sección 4.1.

4.2.1.2 Cálculo de distancias en el MR

Utilizando los números obtenidos en la etapa anterior, se seleccionan los bloques con los mismos índices en el MR y se calculan las distancias euclidianas respecto al “bloque medido restaurado”, cuyo número es el mismo que el “bloque medido inicial”. Estas distancias también se guardan en un matriz llamada “matriz distancia restaurada”

4.2.1.3 Obtención de la variación de distancias MI vs MR

Cada bloque del MI y MR tiene asignadas n distancias que dependen del tamaño del vecindario. Para esta métrica el vecindario escogido fue de 26 vecinos. La Figura 31 muestra un esquema de la relación de los bloques: el “bloque medido” es de color amarillo, y los vecinos más cercanos son los bloques rojos. La razón porque son 26 vecinos es porque es la cantidad de bloques que intersecan las aristas y vértices de un bloque. Ya con la información de distancia de los vecinos se calcula el valor absoluto de la resta entre la “matriz distancia inicial” y “matriz distancia restaurada”. De esta manera, cada bloque tiene 26 valores asociados, los cuales se promedian para obtener el valor de variación asignado al bloque, este valor es un vector que tiene unidad de metros.

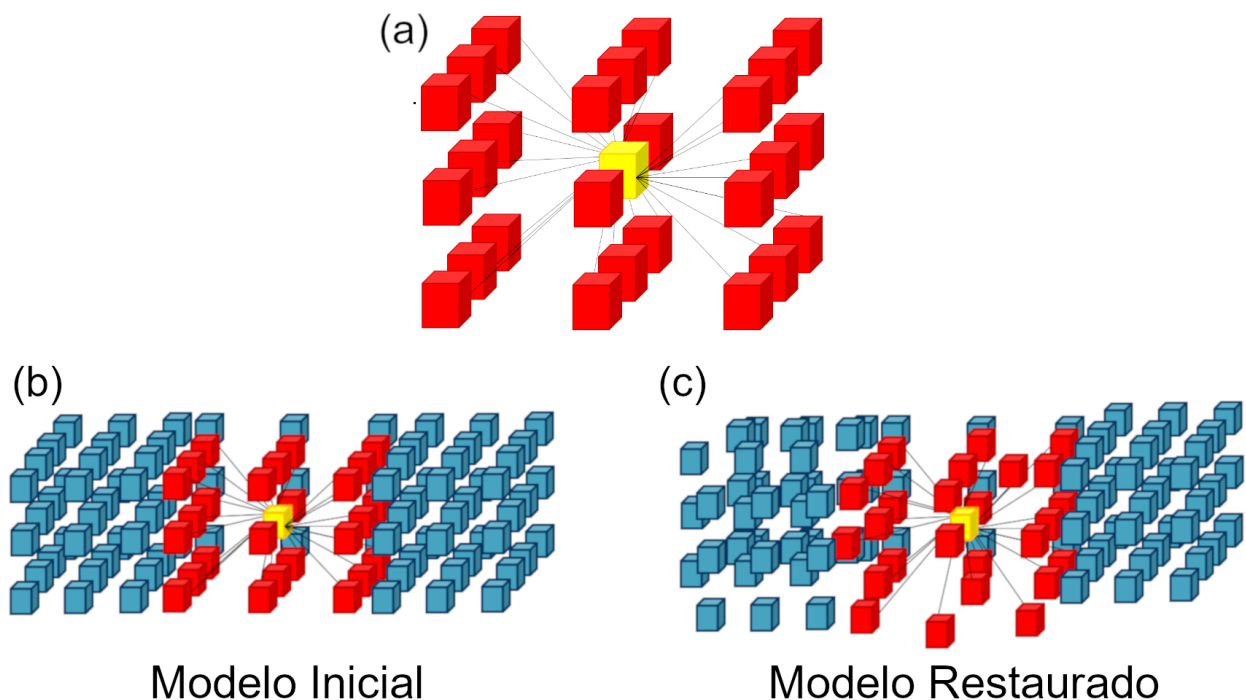


Figura 31. Ejemplo de vecinos cercanos de un bloque. (a) Bloque en amarillo con sus vecinos más cercanos en rojo. (b) Modelo de bloques inicial con un bloque destacado en amarillo con sus vecinos más cercanos. (c) Modelo de bloques restaurado, en amarillo el mismo bloque del modelo inicial y en rojo los vecinos más cercanos, en las nuevas posiciones posterior a la deformación y restauración del modelo.

4.2.1.4 Cálculo de Índice

Para obtener el índice de restauración para cada bloque del modelo se utilizó la siguiente fórmula:

$$I_b = \frac{1}{n} \left(\sum_{v=1}^n \frac{|D_{iv} - D_{rv}|}{D_{iv}} \right)$$

Donde I_b es el índice asociado a un bloque; D_{iv} es la distancia euclidiana entre el “bloque medido inicial” y su vecino v del MI; D_{rv} es la distancia euclidiana entre el “bloque medido restaurado” y su vecino v del MR; n es el número total de vecinos.

Para calcular el índice asociado a todo el modelo se realiza la sumatoria de los índices de cada bloque del MR.

$$I_m = \sum_{b=1}^t I_b$$

Donde I_m es el índice del modelo restaurado; I_b es el índice del bloque b ; t es el número total de bloques del modelo restaurado. Cuando I_m es 0 indica que la restauración no tiene error asociado y a medida que aumenta el I_m la precisión de la restauración disminuye.

En la Figura 32 se aprecia el resultado de restauración medido por la métrica de vecinos cercano y los respectivos índices de restauración de cada punto del modelo. El índice asociado al modelo total es 528.

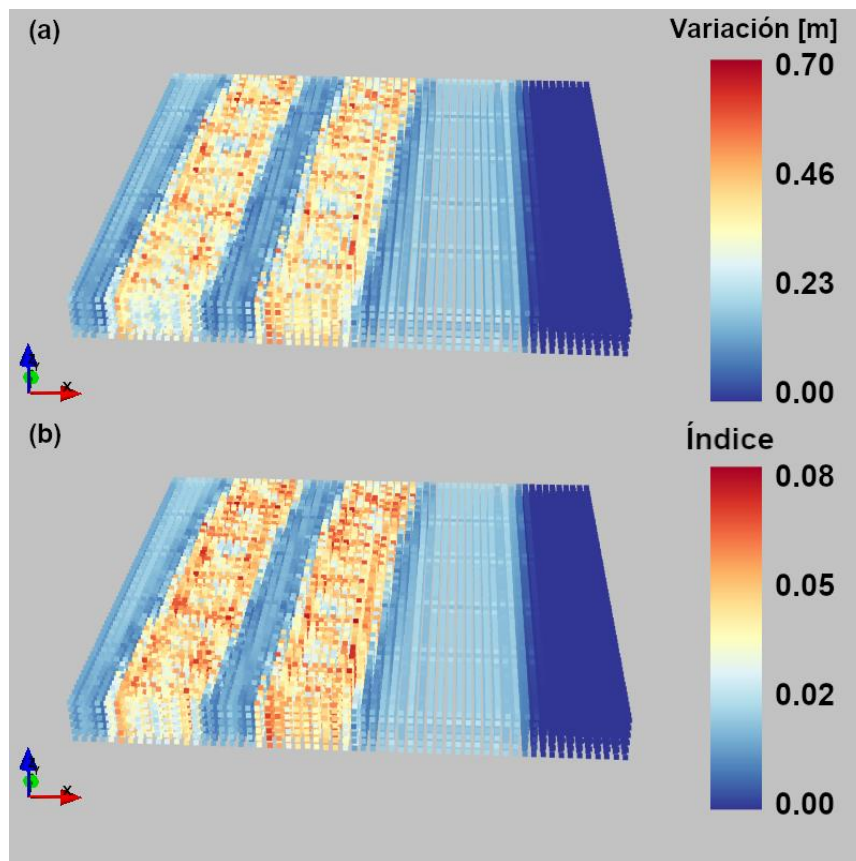


Figura 32. Resultado de la restauración del caso 1. (a) Medidas de restauración al aplicar la métrica Vecinos más Cercanos. (b) Índices de cada bloque para cada punto del modelo.

4.2.2 Discusión sobre Métricas de Validación

La métrica de los Vecinos más Cercanos (VC) tiene ventajas respecto a la métrica de Vector Traslación (VT), como, por ejemplo, no es necesario variar la posición del modelo restaurado ya que es independiente del origen del sistema de coordenadas de los modelos a comparar. Además, no es ambiguo respecto a sus parámetros, en cambio el vector de traslación sí es un parámetro confuso que nace a partir de la combinación de tres vectores seleccionados sin una razón geológica ni estadística, pero sí geométrica. Por otra parte, la métrica de Vecinos más Cercanos tiene una coherencia entre el resultado y la geometría del modelo deformado e, incluso, con la metodología de restauración, ya que se logra apreciar claramente la separación de los dominios de la superficie de referencia explicado en la sección 3.2.2 Aplanamiento de la Superficie de Referencia. En la Figura 32 se aprecia la separación de los dominios donde las variaciones e índices iguales a cero se ubican en el dominio plano y, además, los mayores índices, al parecer, se obtienen en los flancos del pliegue. Para poder verificar esta apreciación visual, se aplicó la métrica VC a comparar el modelo el modelo deformado con el restaurado (Figura 33a) y con el modelo inicial (Figura 33b). Efectivamente los mayores índices para este caso se ubican en los flancos del pliegue.

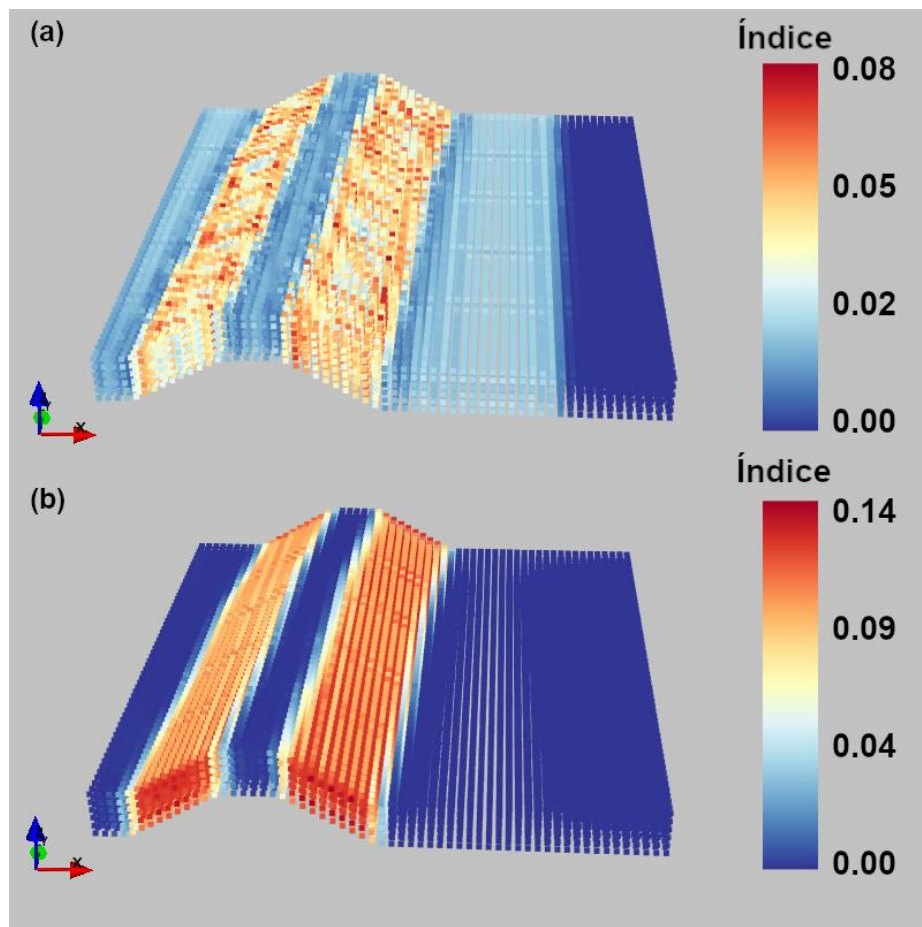


Figura 33. Resultados visualizados en el modelo deformado del caso 1. (a) Índices obtenidos de la comparación del modelo inicial vs restaurado visualizados en el modelo deformado. (b) Índices obtenidos de la comparación del modelo inicial vs modelo deformado visualizados en el modelo deformado.

La métrica de los Vecinos más Cercanos logra adecuadamente realizar un análisis comparativo, ya que se puede aplicar para todos los modelos de este estudio. Esto permite conocer qué caso está mejor restaurado; y, además, se puede aplicar para casos restaurados con otras metodologías de restauración.

Por último, la métrica de VC evalúa si se conserva o no la distribución espacial en un vecindario, el cuál puede variar según el criterio del usuario. Esta libertad y enfoque de la métrica es útil especialmente para la estimación de recursos naturales; ya que, en la simulación geoestadística clásica las correlaciones de distancias son imprescindibles (Poudret et al., 2011). Además, como es posible asociar un índice a cada bloque del modelo y una variación de distancia, resulta ser una ventaja para la toma de decisiones asociadas a la evaluación y estimación de un yacimiento ya que representa la incertidumbre asociada a cada bloque. Por estas razones, la métrica VC logra relacionar de buena manera los objetivos específicos de esta tesis. Además, se diferencia de las métricas actuales de validación de restauración que se basan en la conservación de largos de línea, áreas y volúmenes, y es capaz de evaluar volúmenes discretizados priorizando la conservación de la distribución espacial, lo que aporta un valor agregado a los parámetros actuales de validación.

4.3 RESULTADOS DE MÉTRICA DE RESTAURACIÓN

En la siguiente sección se dan a conocer los principales resultados obtenidos al aplicar las métricas propuestas: Vector de Traslación y Vecinos más Cercanos. Como se trabajó con un total de 45 casos, se seleccionaron los casos más representativos para mostrar en esta sección.

Los resultados se analizaron según el tipo de pliegue; y, a su vez, cada tipo de pliegue tiene tres categorías asociadas que dependen de la metodología de deformación utilizada (Tabla 1).

La Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5 resumen las principales características de los resultados y la Figura 34, Figura 35 y Figura 36, muestran los modelos restaurados con los valores asociados a las métricas, teniendo todas el mismo esquema. En la parte superior se muestran los tres casos seleccionados con sus respectivos estados: deformado y restaurado. En la parte inferior aparecen los casos restaurados al aplicarles las métricas de Vector de Traslación y Vecinos más Cercanos, con una escala que indica la variación en metros. El objetivo de la figura es facilitar la comparación visual al aplicar una u otra métrica de validación al mismo estado restaurado.

4.3.1 Resultados: Pliegue por Flexura de Falla

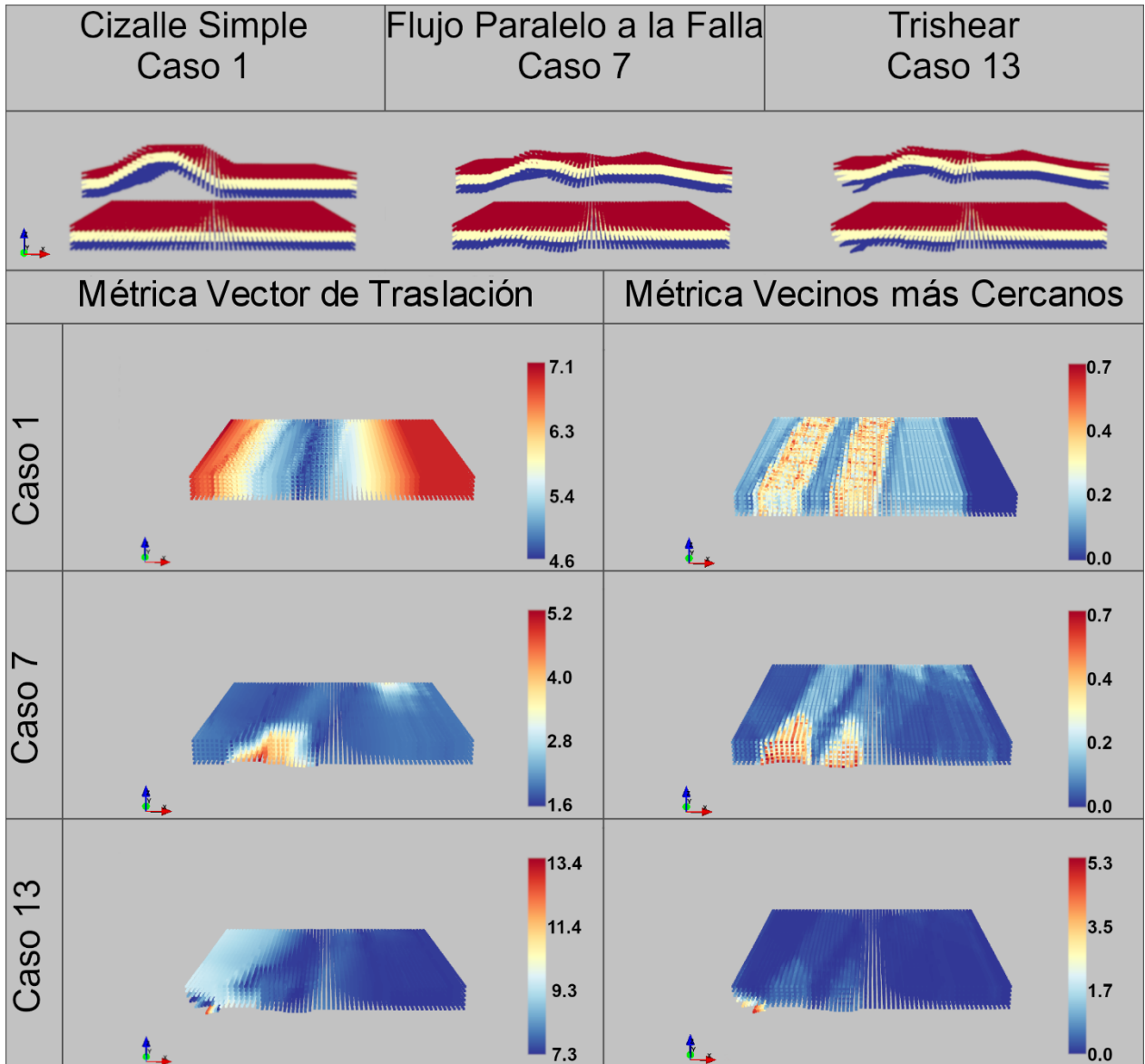


Figura 34. Resultados de métricas de restauración para casos representativos de pliegues por flexura de falla, la escala se mide en metros.

Tabla 3. Principales características de los restados representativos de los pliegues por flexura de falla.

	Métrica Vector de Traslación	Métrica Vecinos más Cercanos
Caso 1	<ul style="list-style-type: none"> • No existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • Mayor concentración de la variación en los bordes del modelo • La mínima variación es mayor a 0 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • Mayor concentración de la variación en los flancos del pliegue • La mínima variación es 0 m, y se obtiene en el dominio plano impuesto por el usuario • La máxima variación es menor a 1 m
Caso 7	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mínima variación es mayor a 0 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mínima variación es 0 m • La máxima variación es menor a 1 m
Caso 13	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mayor variación se concentra en la zona de cizalle triangular • La mínima variación es mayor a 0 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mayor variación se concentra en la zona de cizalle triangular • La mínima variación es 0 m

4.3.2 Resultados: Anticlinales de Rollover

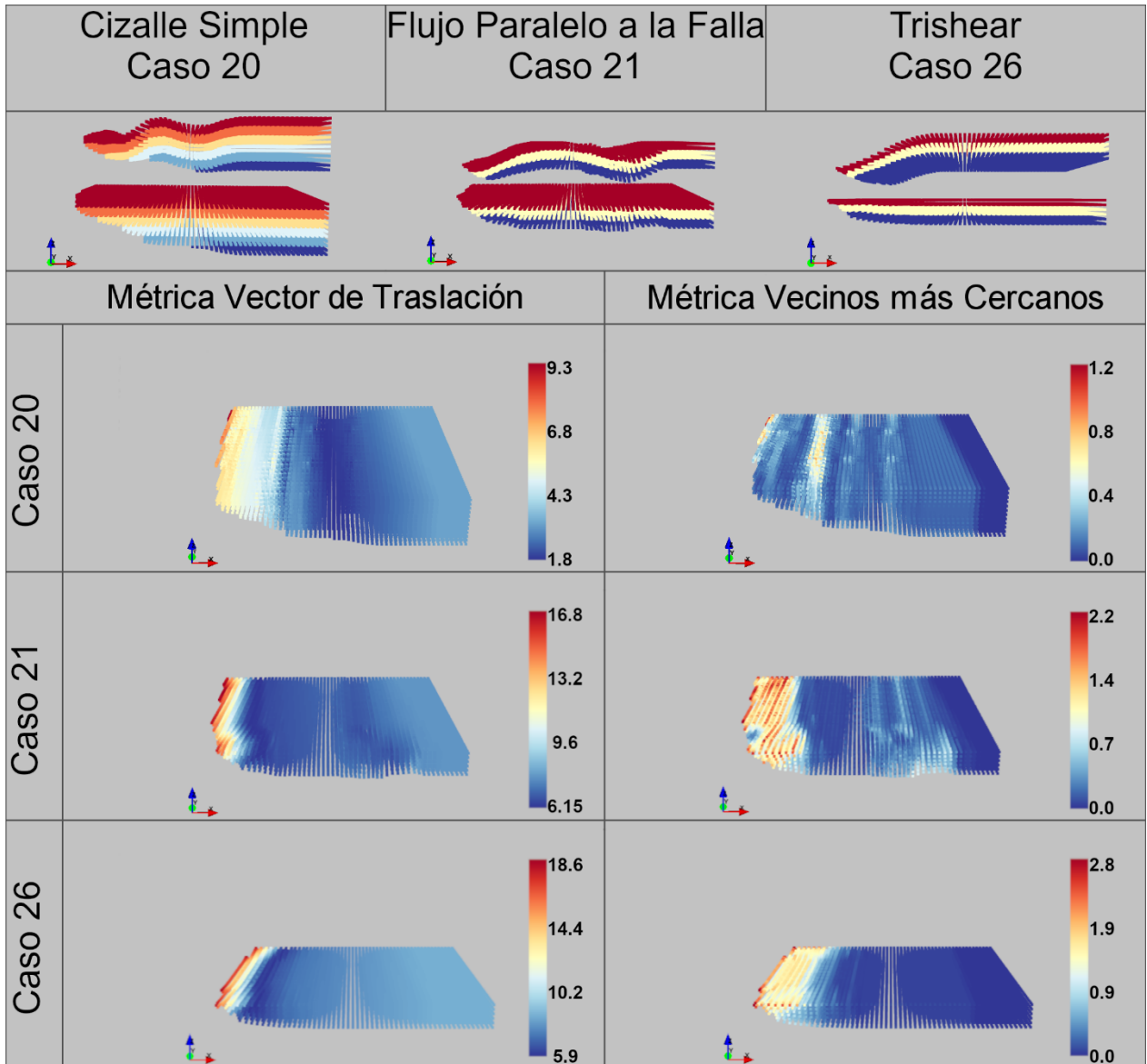


Figura 35. Resultados de métricas de restauración para casos representativos de anticlinales de *rollover*.

Tabla 4. Principales características de los restados representativos de los anticlinales de rollover.

	Métrica Vector de Traslación	Métrica Vecinos más Cercanos
Caso 20	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • Mayor concentración de la variación en el flanco del anticlinal • La mínima variación es mayor a 0 m, y se concentra en el centro del modelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • Mayor concentración de la variación en el flanco del anticlinal • La mínima variación es 0 m, y se obtiene en el dominio plano impuesto por el usuario
Caso 21	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mínima variación es mayor a 0 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mínima variación es 0 m • La máxima variación es menor a 1 m
Caso 26	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mayor variación se concentra en el pliegue del anticlinal • La mínima variación es mayor a 0 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mayor variación se concentra en el pliegue del anticlinal • La mínima variación es 0 m

4.3.3 Resultados: Pliegue de Propagación de Falla

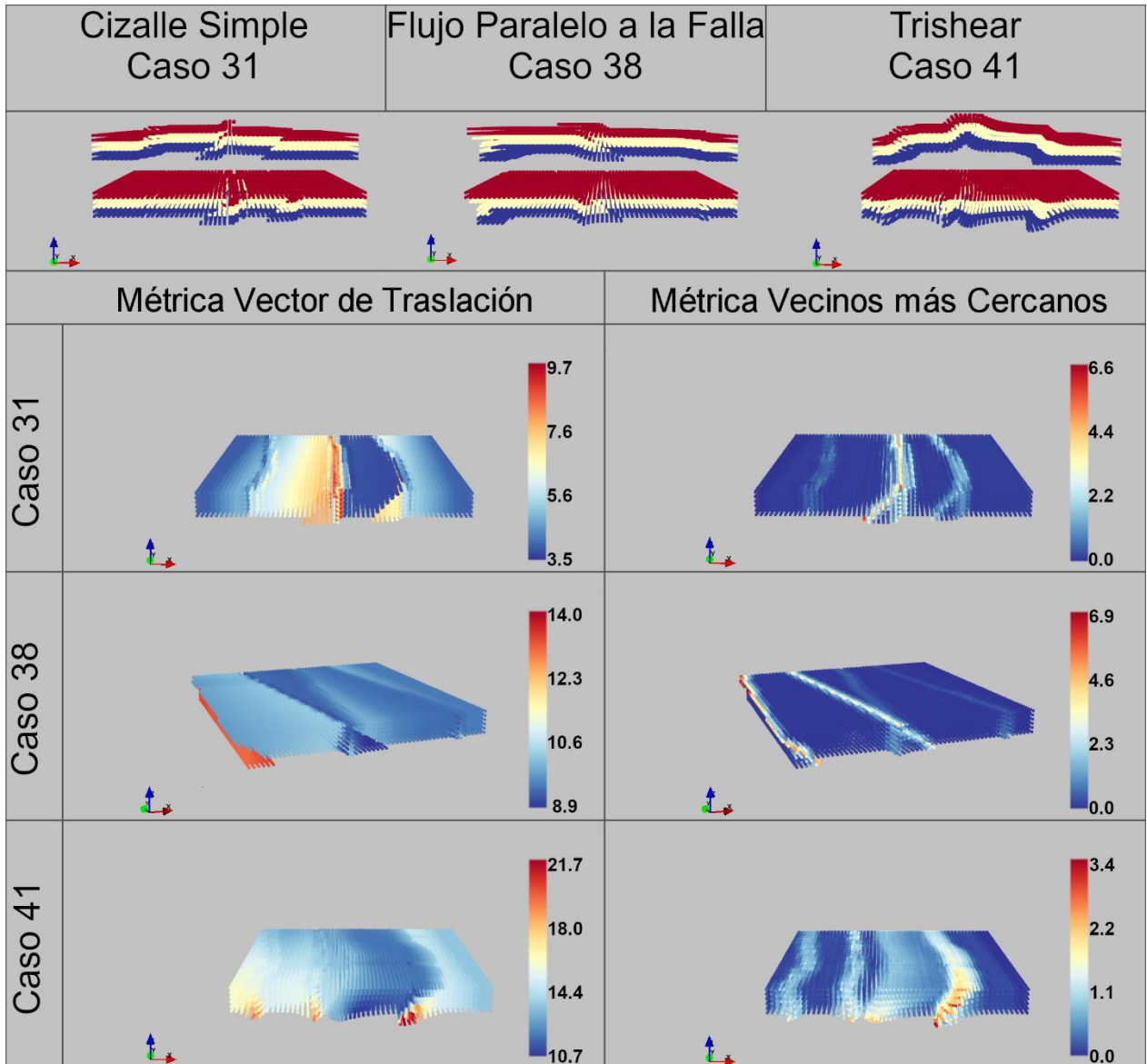


Figura 36. Resultados de métricas de restauración para casos representativos de pliegues por propagación de falla.

Tabla 5. Principales características de los restados representativos de los pliegues por propagación de falla.

	Métrica Vector de Traslación	Métrica Vecinos más Cercanos
Caso 31	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mínima variación es mayor a 0 m • La menor variación se concentra en el centro del modelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • Mayor concentración de la variación en el flanco del anticlinal • La mínima variación es 0 m, y se obtiene en el dominio plano impuesto por el usuario • La menor variación no se concentra en el centro del modelo
Caso 38	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mínima variación en mayor a 0 m y se concentra en la parte frontal del modelo • La menor variación se concentra en el centro del modelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mínima variación es 0 m • La máxima variación se concentra en las zonas que fueron cortadas por fallas • La menor variación no se concentra en el centro del modelo
Caso 41	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mayor variación se concentra en los flancos de los pliegues • La menor variación de concentra en el centro del modelo • La mínima variación es mayor a 0 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una correlación entre la geometría del pliegue y el resultado al aplicar la métrica al modelo restaurado • La mayor variación se concentra en los flancos de los pliegues • La menor variación no se concentra en el centro del modelo • La mínima variación es 0 m

Los resultados de todos los casos de estudio de las métricas vector de translación y vecinos más cercanos se encuentran los ANEXO B y ANEXO C, respectivamente.

Para cada caso representativo se realizó un histograma de los índices para comparar las distintas metodologías de deformación (Figura 37).

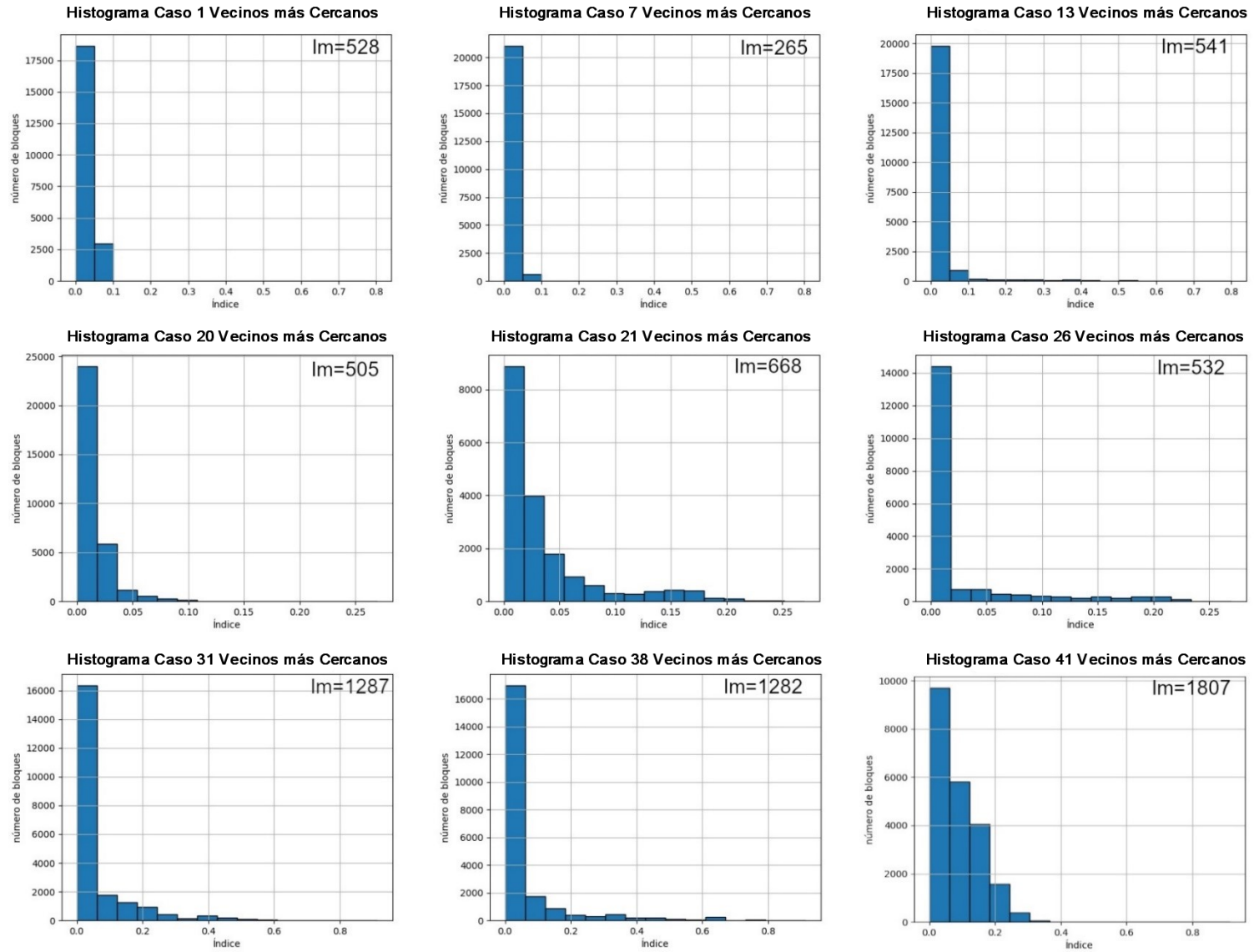


Figura 37. Histogramas de los índices de los casos representativos al aplicar la métrica Vecinos más Cercanos. Im: índice del modelo.

El menor índice es para el caso 7 pliegue por flexura modelado por cizalle simple, el máximo error en el caso 41 pliegue por propagación modelado por trishear. En promedio los valores con menor índice están asociados a los pliegues por flexura de falla y en los mayores valores están asociados a los pliegues por propagación. Analizando la distribución de los índices se obtiene que, para los casos de pliegues por flexura, la distribución se concentra notoriamente con valores de índice menores a 0.05, a diferencia de los anticlinales de rollover y pliegues por propagación que tienen mayor distribución de valores de los índices obtenidos, siendo el caso 41 el que tiene una mayor variación de los índices.

A modo de sumario de los resultados, la Tabla 6 contiene el promedio de los resultados para cada categoría de métrica y el índice.

Tabla 6. Promedio de los resultados por clase asociados a la métrica Vector de Traslación (VT), Vecinos más Cercanos (VC) e Índice (I).

Tipos de pliegue	Cizalle Simple			Flujo Paralelo a la Falla			Trishear		
	CLASE 1			CLASE 2			CLASE 3		
Pliegue por flexura de falla	VT (m)	VC (m)	I	VT (m)	VC (m)	I	VT (m)	VC (m)	I
		3.62	0.09	296.6	3.31	0.12	385.2	6.09	0.32
Anticlinal de rollover	CLASE 4			CLASE 5			CLASE 6		
	VT (m)	VC (m)	I	VT (m)	VC (m)	I	VT (m)	VC (m)	I
	2.72	0.09	356.4	4.52	0.15	396.6	6.27	0.2	477.4
Pliegue por propagación de falla	CLASE 7			CLASE 8			CLASE 9		
	VT (m)	VC (m)	I	VT (m)	VC (m)	I	VT (m)	VC (m)	I
	7.78	0.52	1556.8	6.62	0.39	1165.8	17.35	0.74	2914.6

4.4 Discusión Resultados métricas de restauración

Existen notorias diferencias en los resultados dependiendo de la métrica utilizada. Estas diferencias residen tanto en la concentración de las zonas de mayor variación, como en los rangos de cuantificación. Para la métrica de Vecinos más Cercanos las mayores variaciones se concentraron en los flancos de los pliegues y en el caso de la métrica de Vector de Traslación no fue posible identificar una correlación con la geometría del cuerpo deformado y el cuerpo restaurado al aplicar la métrica, debido a la alta variabilidad en los resultados. La Figura 38 es un ejemplo de alta

correlación entre la geometría del cuerpo deformado y el resultado en el cuerpo restaurado al aplicar el índice de restauración basado en la métrica de vecinos más cercanos. En este caso en particular, los mayores valores se concentran en los flancos de los pliegues.

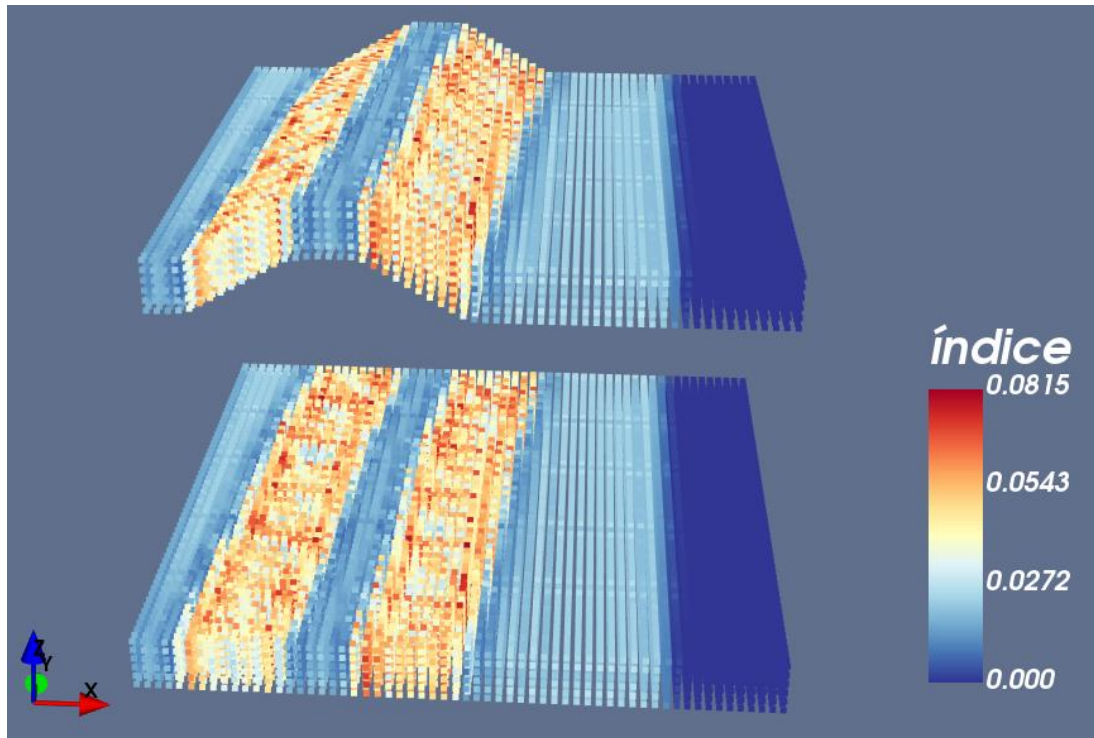


Figura 38. Caso 1 con su estado deformado en la parte superior y el estado restaurado en la parte inferior. En ambos se ha graficado el índice de restauración asociado a cada punto del modelo. Índice de restauración del cuerpo 528.

En el caso 21 (Figura 39), se observa que los mayores índices se concentran en el flanco frontal del anticlinal del *rollover* y en los flancos del sinclinal que se forma en parte dorsal del bloque colgante. Al igual que en el caso 1, se aprecia en el resultado claramente los dominios delimitados por el usuario en la superficie de referencia (ver sección 3.2.2 Aplanamiento de la Superficie de Referencia), donde los menores índices se concentran en el dominio que no se restauran.

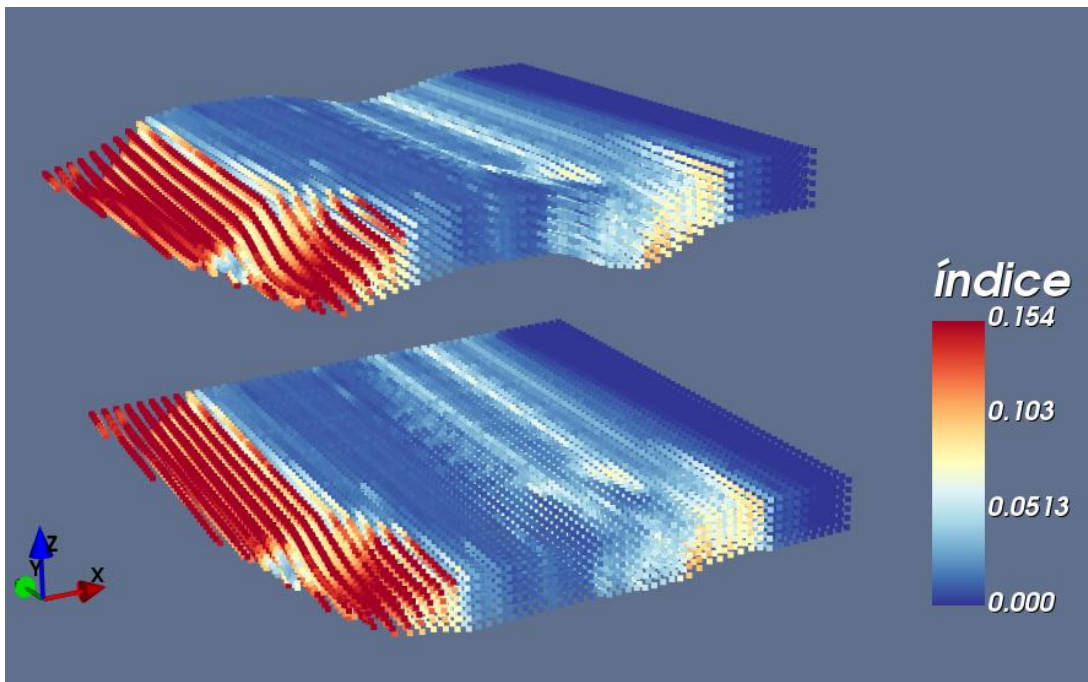


Figura 39. Caso 21 con su estado deformado en la parte superior y el estado restaurado en la parte inferior. En ambos se ha graficado el índice de restauración asociado a cada punto del modelo. Índice de restauración del cuerpo 668.

El caso 41 también se aprecia la correlación entre el resultado de la restauración y los pliegues en el cuerpo (Figura 40), donde al igual que en los casos anteriores, los mayores índices se concentran en las zonas de los flancos de los pliegues.

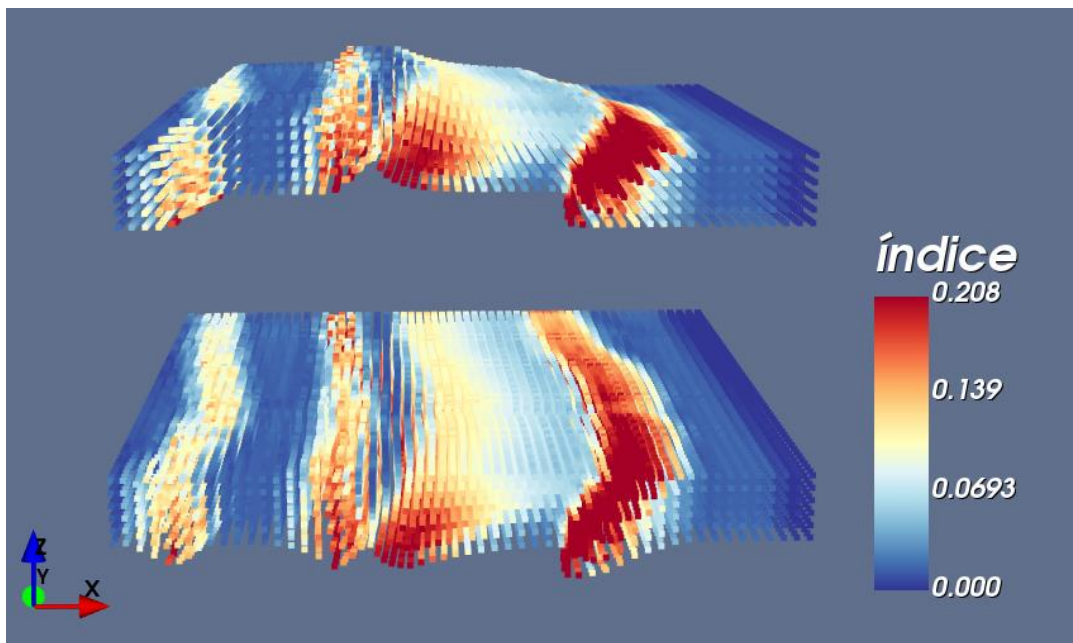


Figura 40. Caso 41 con su estado deformado en la parte superior y el estado restaurado en la parte inferior. En ambos se ha graficado el índice de restauración asociado a cada punto del modelo. Índice de restauración del cuerpo 1806.

Respecto al rango de los resultados, en el caso de la métrica de Vecinos más Cercanos las variaciones obtenidas son menores a 1 m y para la métrica Vector de Traslación se obtienen máximos de variación de decenas de metros.

Para la métrica VC, los mayores índices se obtienen en los pliegues de propagación (Tabla 6). Esto se puede explicar por la geometría que los caracteriza, donde se producen pliegues asimétricos con flancos frontales muy inclinados con respecto a los dorsales (clase 9), e incluso pliegues volcados (clase 7, 8 y 9). Esto representa un problema para el algoritmo de U-Fo, específicamente para la obtención de la superficie de referencia, ya que al obtener la proyección de 2D de la nube de puntos, el algoritmo no es capaz de obtener una triangulación de la zona volcada (Figura 41), un ejemplo de cómo afecta la correcta obtención de la superficie de referencia en la restauración en los pliegues volcados se observa en la Figura 42, donde lo mayores índices se concentran en la zona volcada. Revisar sección 3.2.1. Obtención de Superficie de Referencia.

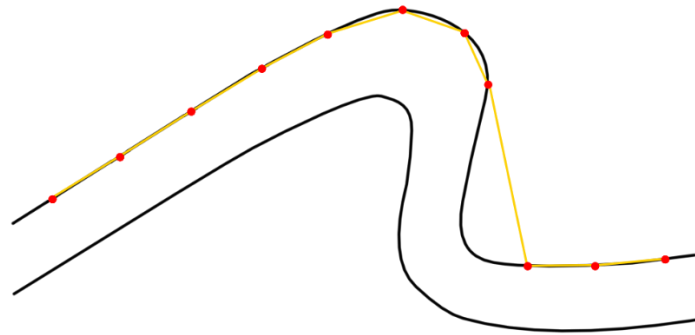


Figura 41. Esquema en 2D obtención de superficie de referencia. En negro un pliegue asimétrico, los puntos rojos representan los puntos que el algoritmo obtiene de la vista en planta del modelo con la posición a mayor altura de cada punto. En amarillo la superficie obtenida.

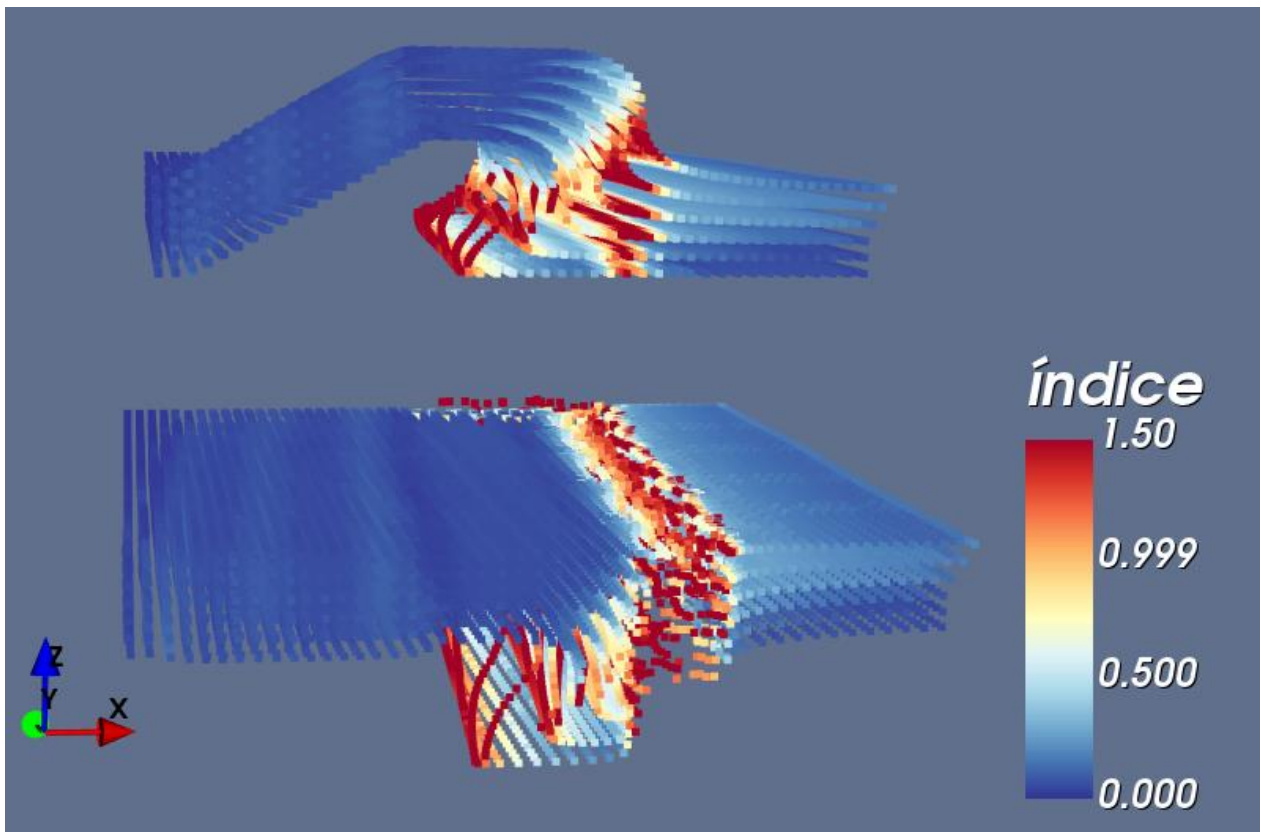


Figura 42. Ejemplo de pliegue de propagación de falla volcado en su estado deformado en la parte superior y su estado restaurado en la parte inferior, con los valores de índices de restauración respectivos. Índice de restauración del cuerpo 7284.

Por otra parte, solo considerando la metodología de deformación, los mayores índices se obtuvieron en los casos modelados por trishear. Este resultado se explica ya que al deformar el modelo inicial se produce una variación en el espesor ubicado en la zona triangular. El algoritmo de restauración al preservar las distancias entre los bloques y los triángulos de la SR (revisar sección 3.2.3 Aplanamiento del Modelo de Bloques) preserva el espesor del modelo deformado y por ende al comparar el modelo restaurado versus el inicial hay una mayor variación en estas zonas. Estas sectores con mayores índices podrían representar un interés económico, ya que se puede concluir que asociado a la deformación se generó un mayor espacio que puede haber sido rellenado por fluidos ricos en minerales o hidrocarburos.

Por último, como no se preservan los largos de líneas al deformar los modelos iniciales, esto explicaría el fuerte impacto en las variaciones asociadas a la métrica de Vector de Traslación, pero tiene poca influencia en los resultados de la métrica de Vecinos más Cercanos ya que esta compara las distancias en vecindarios pequeños respecto al volumen del todo el modelo.

CAPÍTULO 5: ESTIMACIÓN DE RECURSO NATURAL

Con el fin de validar y testear el impacto que tiene una restauración geológica en la estimación de recursos se hizo un ejemplo de un caso mineralizado sintético. A continuación, se dan a conocer los principales resultados obtenidos a partir de la metodología explicada en la Sección 1.4.2 Metodología asociada al objetivo específico 2.

El modelo inicial del caso de estudio es una geometría compuesta de tres litologías distintas con un borde irregular, el cual fue deformado por distintos eventos (Figura 43).

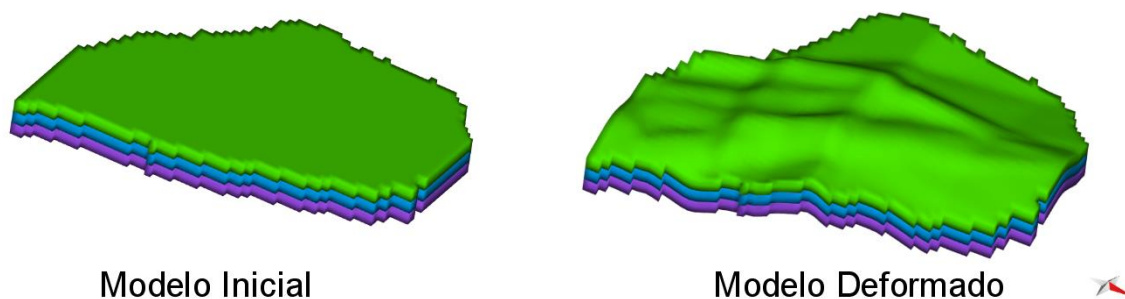


Figura 43. Estado inicial y deformado del modelo que representa un caso mineralizado.

En el modelo inicial se realizó la simulación de un yacimiento de cobre (Figura 44a), esto con el objetivo de simular un yacimiento con leyes reales de cobre. Una vez establecida la distribución de las leyes en los bloques respectivos en el modelo deformado (Figura 44b), se crearon sondajes para utilizar la información en ellos para estimar según el método tradicional y el método U-Fo (Figura 44c).

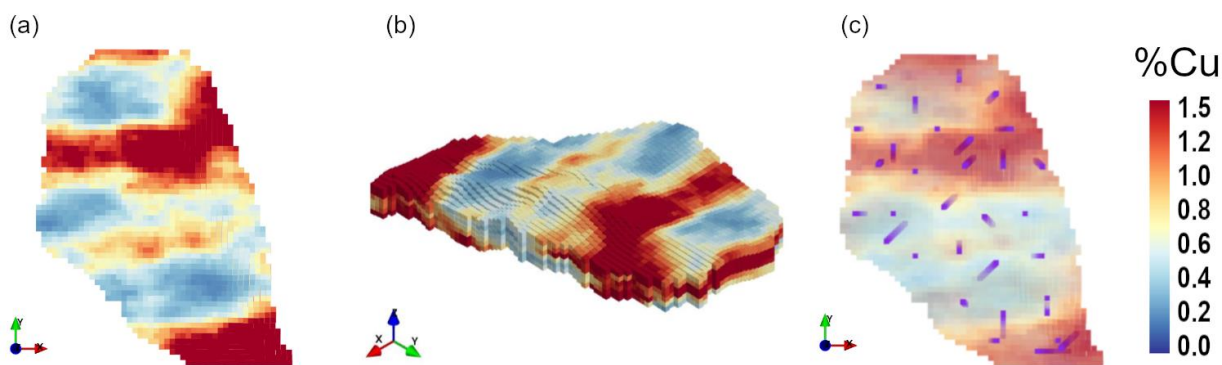


Figura 44. (a) Vista en planta del estado inicial del caso sintético que representa un yacimiento. (b) Modelo de bloques deformado con sus respectivas leyes. (c) Modelo deformado visto en planta con sondajes sintéticos.

5.1 ESTIMACIÓN DE RECURSOS

A partir de la información de ley de los sondajes, se procedió a estimar el recurso por el método tradicional y U-Fo. En ambos casos se calculó el variograma experimental para realizar el modelamiento del variograma, Figura 45 y Figura 46, respectivamente.

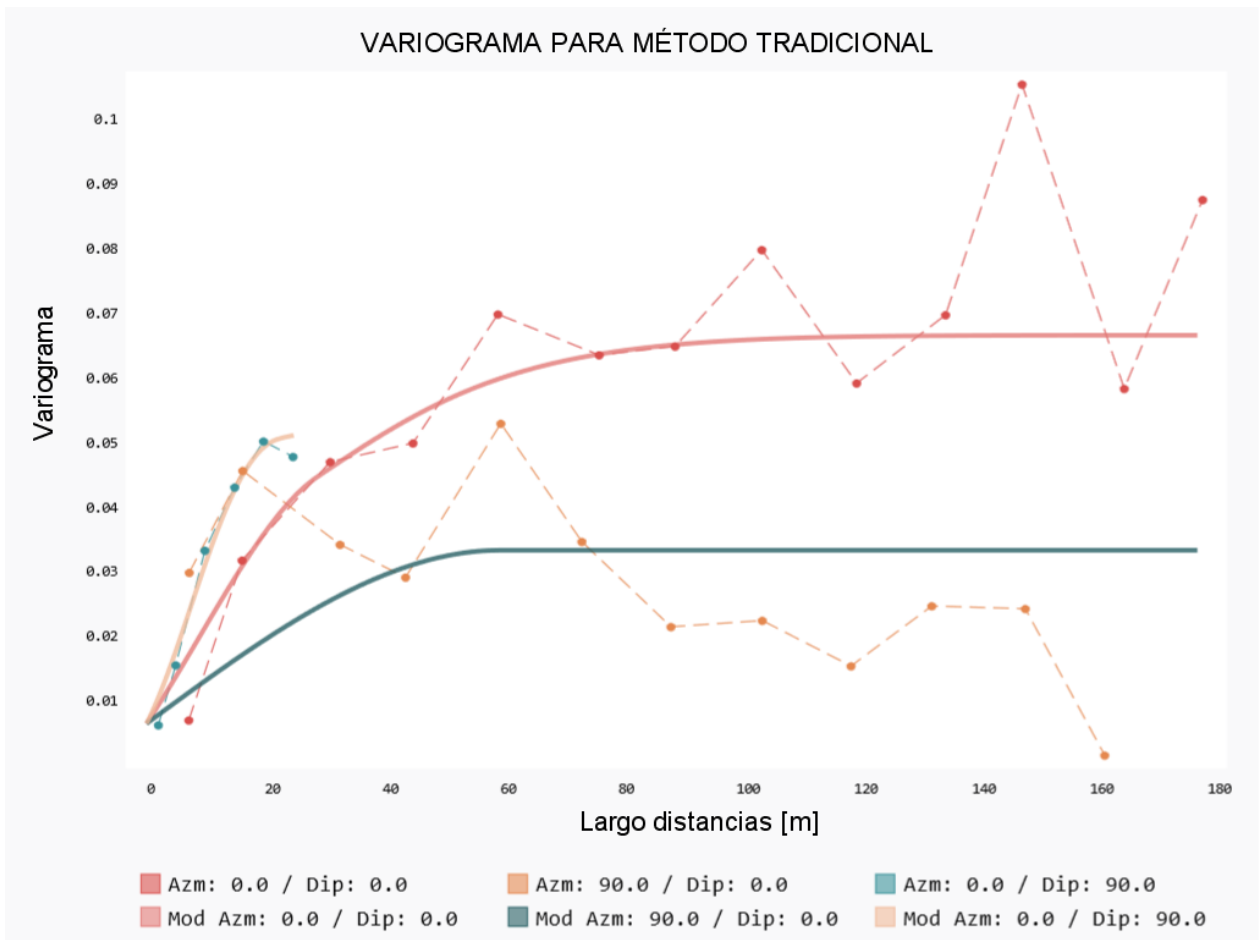


Figura 45. Variograma modelado con los datos del variograma experimental tradicional. Las direcciones para el variograma son NS, EW y vertical.

La ecuación que representa al modelo de variograma utilizado es la siguiente:

$$\gamma(h) = 0.006 + 0.027 * sph(29,60,22) + 0.018 * gauss(114, \infty, 40) + 0.015 * gauss(175, \infty, \infty)$$

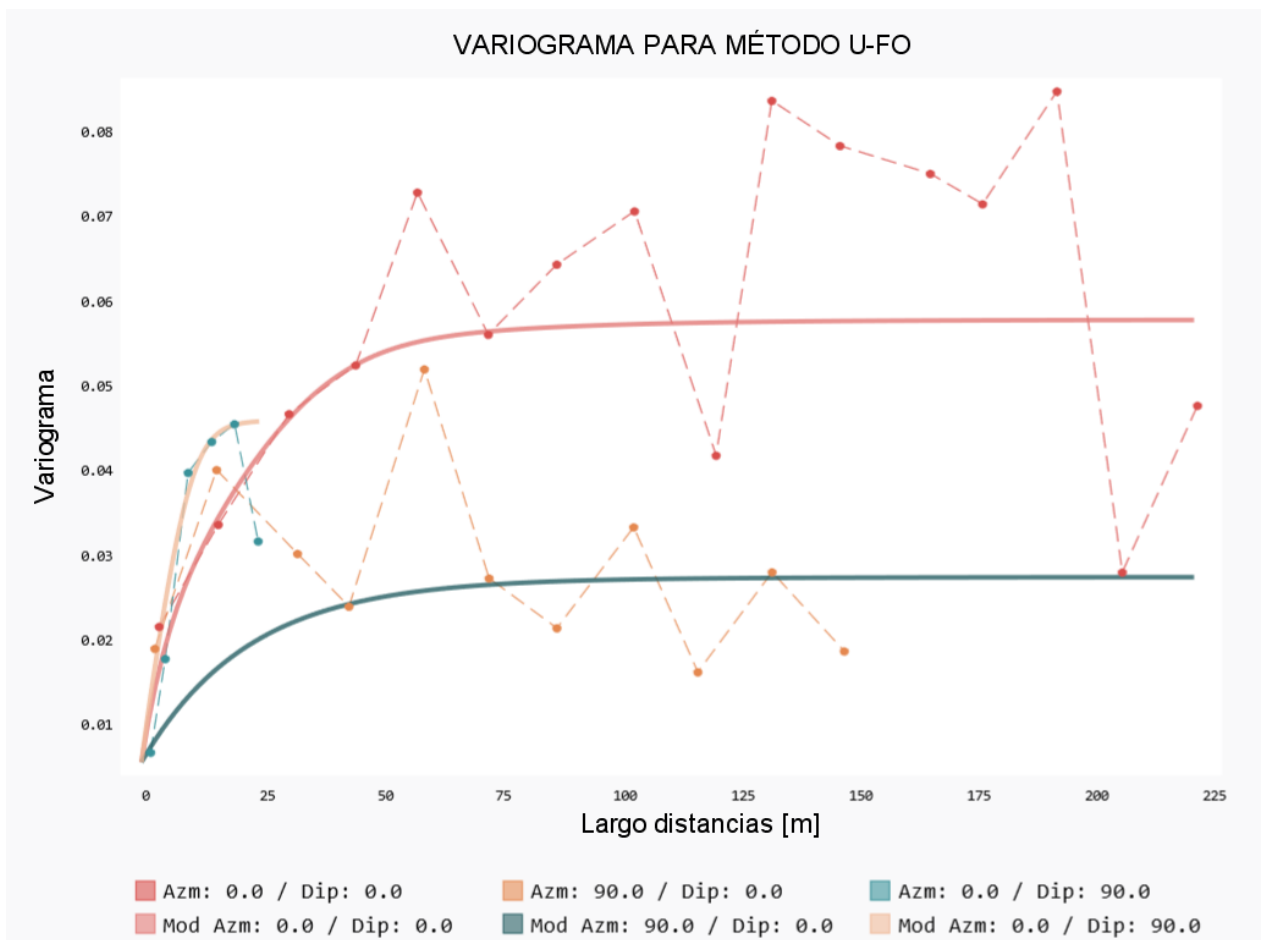


Figura 46. Variograma modelado para variograma experimental U-Fo. Las direcciones para el variograma son NS, EW y vertical.

La ecuación que representa al modelo de variograma utilizado es la siguiente:

$$\gamma(h) = 0.005 + 0.022 * \exp(20,66,15) + 0.019 * \text{gauss}(94, \infty, 27) + 0.012 * \text{gauss}(100, \infty, \infty)$$

Una vez concluido el análisis variográfico, se realizó la validación del modelo de variograma y parámetros de vecindad para la estimación (Kriging Ordinario) mediante la técnica de *jackknife*, donde se escogió de manera aleatoria un 70% de las muestras totales para estimar el 30% restante. Para el caso del método tradicional, se probó con diferentes parámetros de validación, donde el mejor plan de kriging contiene 32 muestras por vecindad con 4 datos por octante con radios de búsqueda de 90 m, 45 m y 20 m para los ejes X, Y y Z, respectivamente. Para el caso de U-Fo el mejor plan de kriging ordinario tiene 32 muestras por vecindad con 4 datos por octante con radios de búsqueda de 100 m, 70 m, y 25 m para los ejes X, Y y Z respectivamente.

Los resultados obtenidos indican que los parámetros utilizados para la estimación son adecuados por lo que estos se utilizarán para la estimación del modelo. Para el caso del método tradicional, el número de bloques del modelo de 11718 y los que se lograron estimar efectivamente fueron 11705, es decir, 13 bloques no se lograron estimar. Esto se debe a que la vecindad de búsqueda no encontró suficientes datos para realizar la estimación de estos bloques. Por otra parte, al realizar una restauración del modelo de bloques previa a la estimación de recurso, es decir, usar el método U-Fo, se lograron estimar todos los bloques del modelo.

En la Figura 47 se muestra el resultado de estimación de cobre con los dos métodos. A simple vista no se observan grandes variaciones en la distribución de ley de cobre.

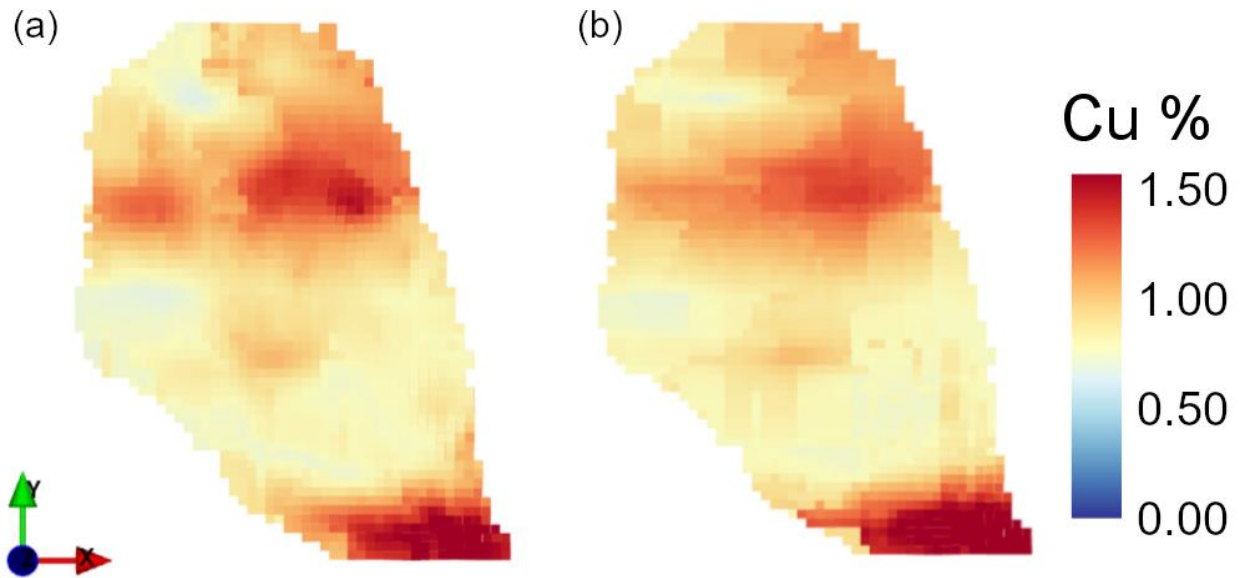


Figura 47. (a) Ley de cobre para caso tradicional vista en planta. (b) Ley de cobre para caso U-Fo vista en planta.

Para la evaluación de recursos es importante el análisis de la varianza de estimación, la cual depende principalmente de la cantidad de datos utilizados para estimar un bloque, modelo de variograma y distancia de los datos al bloque. En la Figura 48 se muestra el resultado para ambos métodos, en el caso tradicional la menor varianza se concentra en las zonas cercanas a los sondajes, en cambio en el caso con U-Fo, las menores varianzas se distribuyen de una manera alargada y no de forma concéntrica a los sondajes.

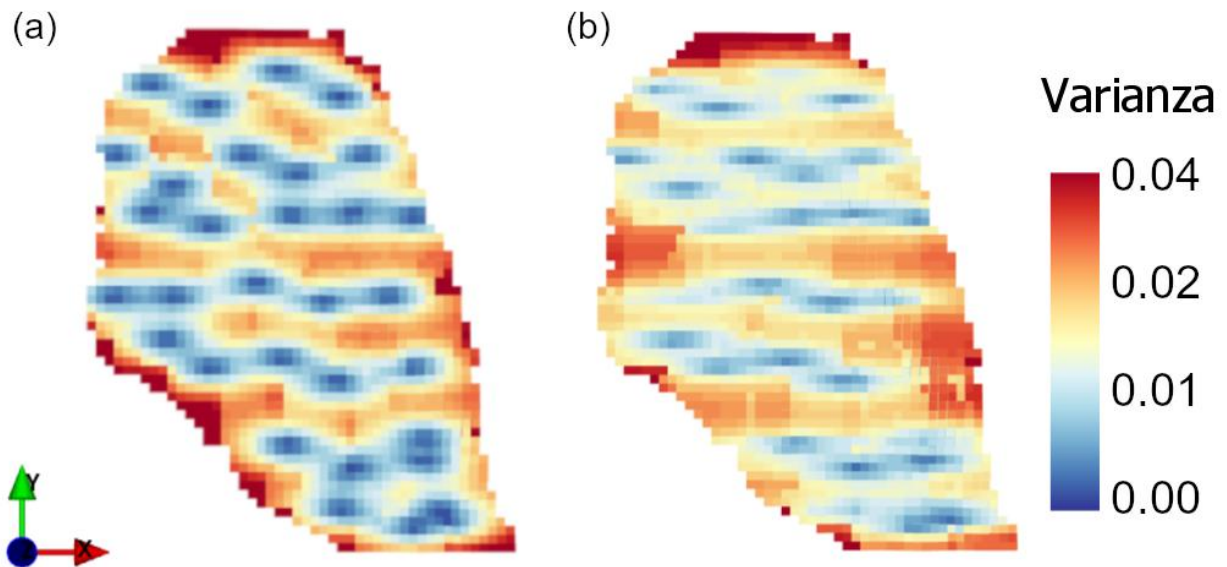


Figura 48. (a) Varianza de estimación caso tradicional. (b) Varianza de estimación caso U-Fo.

5.2 CATEGORIZACIÓN DE RECURSOS

Una vez completada la estimación de recursos del yacimiento, se realizó la categorización de los bloques de acuerdo con la varianza de estimación obtenida. Los bloques medidos son los que presentan mayor confianza en su estimación, por ende, tienen menor varianza, luego le siguen los bloques indicados y finalmente los inferidos, los cuales presentan menor confianza (mayor varianza de estimación). Para ambos casos se utilizó una malla de categorización de 25 m x 25 m, que permitió estimar para el caso tradicional la producción anual con un error relativo de 8,11% en un intervalo de confianza del 90%, lo que entrega una varianza de corte de 0.014. En el caso de U-Fo, el error relativo asociado a la producción anual es de 14,38% en un intervalo de confianza de 90%, lo que entrega una varianza de corte de 0.017.

Para la producción trimestral, la malla de categorización obtenida para encontrar la varianza de corte para recursos medidos-indicados es de 15 m x 15 m. Para el caso tradicional permitió estimar la producción con un error relativo de 6,28 % con varianza de corte de 0.006. En cambio, para el caso de U-Fo el error fue de 11,47% con una varianza de corte de 0.001 para recursos medidos-indicados. Ambos resultados cumplen con un error de tolerancia aceptable según el criterio de AMSA, que postula que los recursos medidos tienen una tolerancia de error trimestral de 15% para malla de sondajes menor o igual a 70 m por 70 m; para recursos indicados una tolerancia de error anual de 15% para mallas de sondajes menores o iguales a 100 m por 100 m y; para recursos inferidos una tolerancia de error anual de 25% para mallas de sondajes menor o igual a 150 m por 150 m. (Gálvez et al., 2016). La Tabla 7 resume los resultados de la categorización de ambos métodos y en la Figura 49 se visualizan los resultados.

Tabla 7. Comparación de categorización de recursos usando método tradicional y U-Fo.

	MÉTODO TRADICIONAL	MÉTODO U-FO
Nº BLOQUES MEDIDOS	937	1709
Nº BLOQUES INDICADOS	2831	3752
Nº BLOQUES INFERIDOS	7937	6257
TOTAL	11705	11718

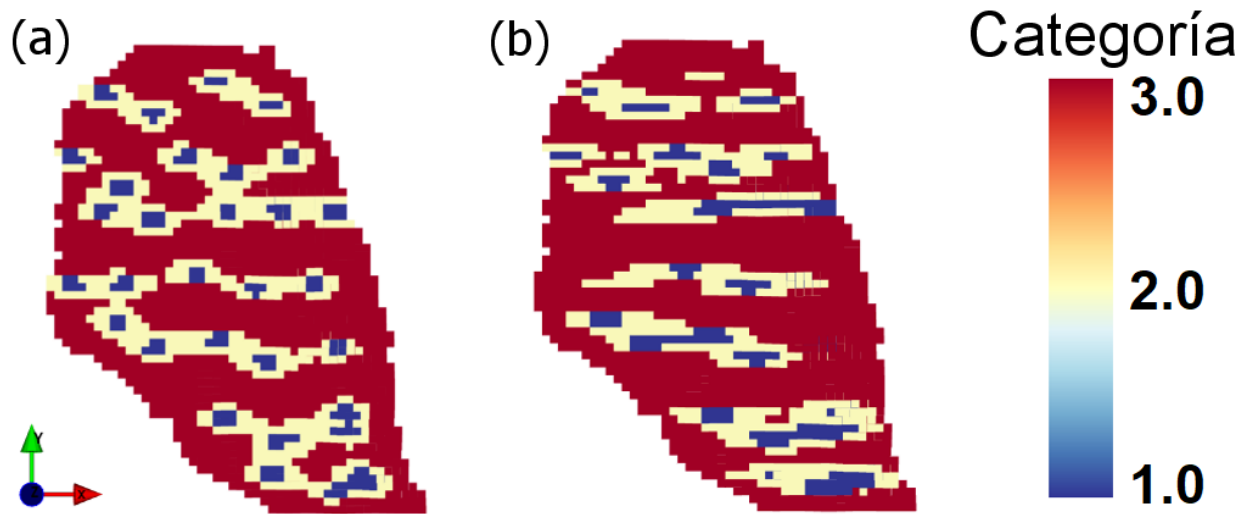


Figura 49. Categoría de recursos vista en planta siendo 1: medidos, 2: indicados y 3: inferido. (a) Categorización caso tradicional. (b) Categorización caso U-Fo.

Por último, se calculó un error de estimación comparando con el caso sintético los resultados de estimación de ambos métodos. Este error se calculó como el valor absoluto de la diferencia entre el valor real del bloque y el valor estimado para cada caso. Se agregó una tolerancia de 0.01 en la ley de cobre, es decir, si la diferencia entre el error con U-Fo y el error tradicional es menor a dicha tolerancia, entonces se asume que ambos métodos tienen un error igual. Se tomó esta consideración para que en aquellos casos en que un error fuese levemente mayor al otro no se asumiera directamente que un caso es mejor que otro, sino que debería existir una diferencia considerable para determinar efectivamente si un método entrega o no un menor error. Si la diferencia entre el error de U-Fo y el error tradicional es mayor a esta tolerancia, entonces el indicador vale 1 si U-Fo entrega un mejor resultado y 2 si la forma tradicional es mejor en cuanto al error, en el caso de que sean los mismos valores el indicador es 3 (Figura 50a). De la misma manera se comparó la varianza, si el indicador es 1 la varianza es favorable para U-Fo, 2 si es favorable para la forma tradicional y 3 si la varianza es la misma (Figura 50b). La Tabla 8 y Tabla 9 resume los resultados de estimación y varianza respectivamente.

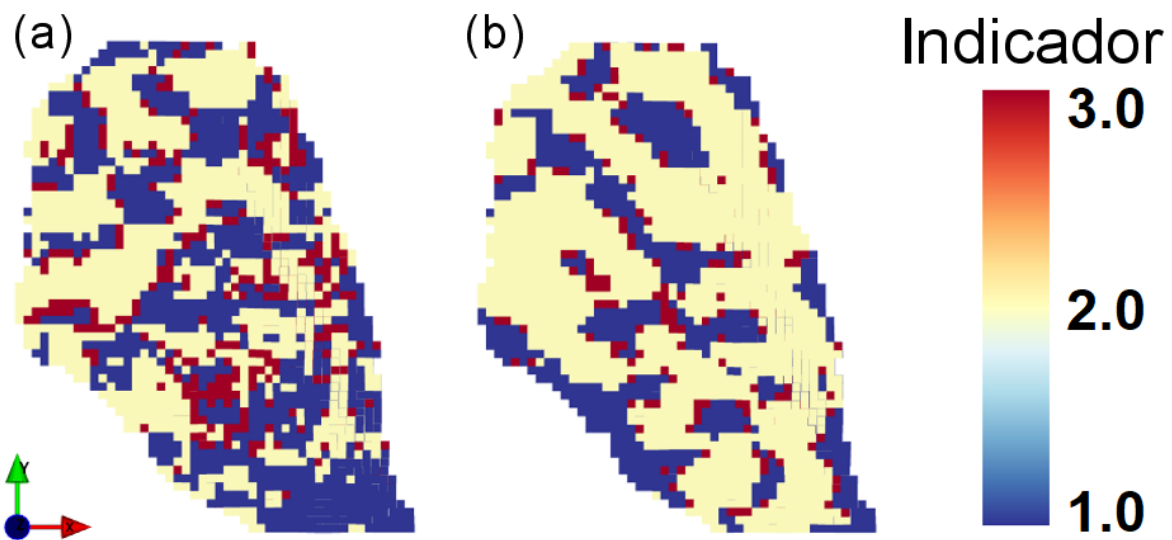


Figura 50. (a) Indicador del error de estimación. (b) Indicador de la varianza.

Tabla 8. Resumen comparativo indicador de estimación.

METODOLOGÍA	NÚMERO DE BLOQUES
FAVORABLES MÉTODO U-FO	4974
FAVORABLES MÉTODO TRADICIONAL	4954
IGUALES RESULTADO	1777
TOTAL	11705

Tabla 9. Resumen comparativo indicador de varianza.

METODOLOGÍA	NÚMERO DE BLOQUES
FAVORABLES MÉTODO U-FO	5906
FAVORABLES MÉTODO TRADICIONAL	4893
IGUALES RESULTADO	906
TOTAL	11705

5.3 ÍNDICE DE RESTAURACIÓN CASO MINERALIZADO

Para finalizar el estudio del caso mineralizado, se aplicó la métrica de vecinos cercanos y se obtuvo el índice de restauración asociado (Figura 51). El índice fue de 419, que es el resultado más bajo obtenido en este trabajo. El máximo de variación obtenido con la métrica VC fue de 1.5 m y el mínimo de 0.0018 m, para más detalle revisar el ANEXO D.

Las mayores variaciones se ubicaron de las zonas de mayor plegamiento del cuerpo, y al igual que en los casos de estudio anteriores, se aprecia la correlación con la metodología de deformación, donde la menor variación se ubica en el dominio seleccionado por el usuario que no se restaura (Figura 52).

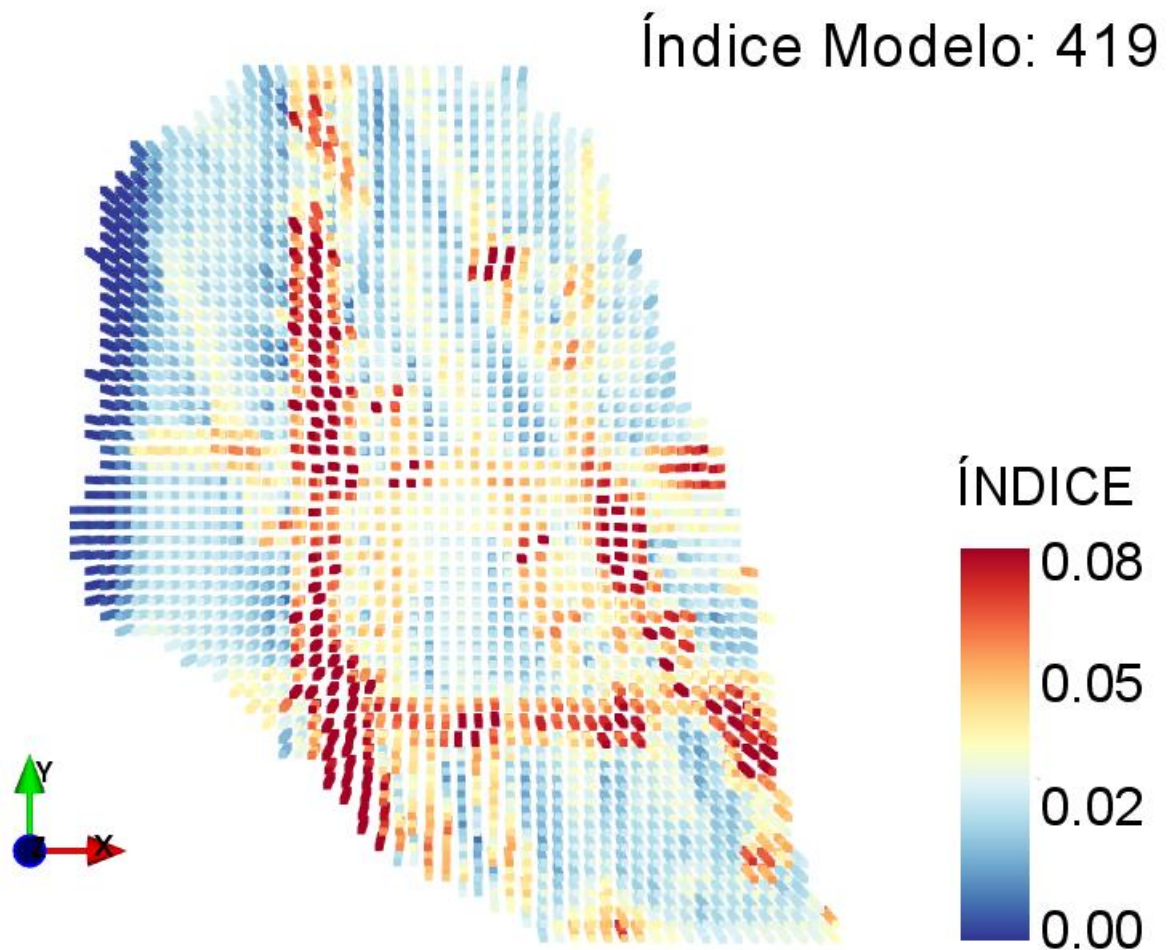


Figura 51. Vista en planta del modelo restaurado al aplicar la métrica vecinos cercanos.

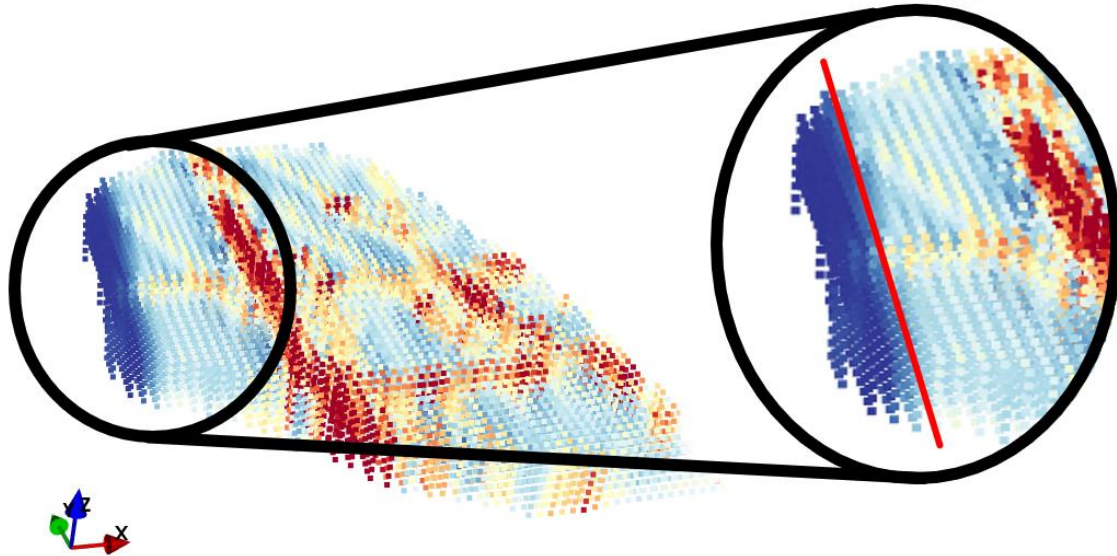


Figura 52. Dominio con menor índice de restauración. Esta zona fue delimitada en la superficie de referencia, categorizándola como el dominio que no se restaura.

5.4 DISCUSIÓN RECURSOS NATURALES

En cuanto al indicador del error de estimación no se tienen diferencias significativas entre ambas metodologías (Tabla 8), ya que solo 20 bloques tienen un menor error cuando se estima con la metodología de U-Fo, pero el indicador asociado a la varianza (Tabla 9) existen más de 1000 bloques favorables al utilizar la metodología de U-Fo en lugar de la tradicional. Este resultado, se ve reflejado en la categorización de recursos, donde hay más de 700 bloques que entran en la categoría de medidos al aplicar U-Fo.

Por lo tanto, la mayor diferencia entre ambos casos se presenta en la varianza de estimación, la estimación con U-Fo entrega mejores resultados en cuanto a la cantidad de bloques con menor varianza de estimación y bloques categorizados como medidos e indicados. Esto ocurre por la distribución espacial de las muestras al realizar el aplanamiento, ya que esto permite que exista una mayor cantidad de muestras utilizadas para la estimación de un bloque dado los parámetros de la vecindad de Kriging. En otras palabras, al aumentar la cantidad de vecinos aumenta la información disponible para estimar, disminuyendo la varianza, y por ende aumenta la confiabilidad de la estimación.

Por último, al aplicar el índice de restauración asociado a la métrica de vecinos más cercanos, queda validada la restauración realizada para este caso, con un valor de índice bajo y con los mayores valores de variación en las zonas plegadas, corroborando la correlación entre la geometría del cuerpo y el resultado de restauración.

A modo de sumario se realiza este capítulo para dar a conocer las principales conclusiones de los distintos focos que contempló este trabajo de investigación.

Hipótesis

Es posible validar una restauración geológica en 3D a partir de un índice de restauración. Este índice se basa en la métrica propuesta de Vecinos más Cercanos, que es capaz de comparar modelos restaurados y evaluar metodologías de restauración, con la condición de que los cuerpos geológicos estén discretizados como modelos de bloque. La métrica propuesta sirve para disminuir la incertidumbre en la estimación de recursos naturales, ya que entrega el resultado de restauración de cada bloque y, por ende, permite conocer en qué sectores del modelo las variaciones son mayores. También permite comparar entre diferentes metodologías de restauración y saber en qué tipo de estructura la restauración es óptima.

Metodología de Restauración basada en Sistema Masa-Resorte

La metodología de restauración basada en un sistema dinámico Masa-Resorte implementada en el software U-Fo ha sido validada con el índice de restauración en función de la métrica de Vecinos más Cercanos, obteniendo resultados con variaciones menores a un metro. Cabe destacar que las métricas y el índice son capaces de cuantificar la restauración, pero queda a criterio del usuario decidir si la metodología de restauración cumple con la tolerancia al error del proyecto. En otras palabras, para algunos casos, variaciones de 1 m o con índice 525, por ejemplo, son despreciables; en cambio, en otras circunstancias, ya sea una variación en la escala del proyecto de distrital a regional o dependiendo del tipo de yacimiento, como un pórfido o una veta, estos valores son considerables y la metodología de restauración no sería la apropiada. La ventaja de proponer esta métrica es que puede ser usada como una gran herramienta para tomar decisiones en la validación de modelos geológicos y estimación de recursos acorde a los criterios del experto.

Para la metodología de restauración de U-Fo en particular, los mejores resultados se obtienen en geometrías con pliegues por flexura de falla y anticlinales de rollover. Para el caso de pliegues por propagación se debe mejorar la obtención de la superficie de referencia, para ello se propone separar las zonas de pliegue en dos cuerpos y restaurar por separado. Los casos modelados por trishear aumentan el espesor en las zonas cercanas a la charnela de los pliegues, aunque en lugar de considerarlo como un error, se propone como zonas de posible interés económico y, por ende, en los sectores con mayores índices podrían ser posibles blancos de exploración.

Índice de restauración

El índice de restauración propuesto en este trabajo es capaz de cuantificar una interpretación cualitativa respecto a una restauración geológica. En otras palabras, se puede considerar como una herramienta numérica basada en conocimiento geológico, que puede evaluar metodologías de restauración de manera cuantitativa.

Este indicador, basado en la métrica de Vecinos más Cercanos, cumple con tener una fuerte relación entre la forma del pliegue y el resultado. De esta manera, queda en evidencia que el índice considera la geología para cuantificar la restauración.

Por último, a diferencias de las métricas actuales de validación de restauración, que se basan en la conservación de largos de línea, áreas y volúmenes, este índice prioriza la conservación de la distribución espacial de los cuerpos. De esta manera es capaz de evaluar volúmenes discretizados, asignando valores a cada parte del volumen, lo que aporta un valor agregado a los parámetros actuales de validación.

Estimación de Recurso Natural

La métrica que tiene un mejor impacto en la estimación de recursos naturales es la de los Vecinos más Cercanos y, además, a partir del análisis del modelo mineralizado se podría recomendar realizar una restauración geológica previa a la estimación del recurso natural. Una de las razones principales es que entrega mejores resultados lo que implica una menor varianza y mayor cantidad de bloques categorizados como medidos e indicados.

Propuestas

Se propone aplicar el índice a casos restaurados con metodologías basadas en otros principios cinemáticos y mecánicos para obtener una mayor validación de la métrica propuestas en este trabajo. Además, una manera de disminuir el sesgo asociado a los algoritmos de deformación sería trabajar con modelos análogos en estudios futuros.

Ya que la validación de la metodología de U-Fo se ha realizado por medio de casos sintéticos, correspondería trabajar con restauración de casos reales y se plantea relacionar el índice de restauración con la energía obtenida en las superficies de referencia.

Finalmente, queda propuesto realizar el mismo trabajo, pero con uno o más casos reales de yacimientos para evaluar el impacto de la restauración en la estimación del recurso neutral, similar a lo que ya se ha realizado por Garrido et al. (2016) .

BIBLIOGRAFÍA

- Allmendinger, R. W. (1998). Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, 17(4), 640–656.
- Cobbold, P. R. (1979). Removal of finite deformation using strain trajectories. *Journal of Structural Geology*, 1(1), 67–72. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191814179900221>
- Dahlstrom, C. D. A. (1969). Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6(4), 743–757. <https://doi.org/10.1139/e69-069>
- Dewey, J. F. (1965). Nature and origin of kink-bands. *Tectono*, 1(6), 459–494.
- Dula Jr, W. F. (1991). Geometric models of listric faults and rollover folds. *AAPG Bulletin*, 75(10), 1609–1625.
- Durand-Riard, P., Caumon, G., & Muron, P. (2010). Balanced restoration of geological volumes with relaxed meshing constraints. *Computers and Geosciences*, 36(4), 441–452.
- Egan, S. S., Buddin, T. S., Kane, S. J., & Williams, G. D. (1997). Three-dimensional modelling and visualisation in structural geology. *Proceedings of the 1996 Geoscience Information Group Conference Conference on Geological Visualisation: Electronic Geology*, 1(7), 67–82.
- Elliott, D. (1983). The construction of balanced cross-sections. *Journal of Structural Geology*, 5(2), 101. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(83\)90035-4](https://doi.org/10.1016/0191-8141(83)90035-4)
- Emery, X. (2013). Geoestadística. *Cursos Análisis Estadístico y Geoestadístico de Datos, Santiago, Chile*.
- Erslev, E. A. (1991). Trishear fault-propagation folding. *Geology*, 19(6), 617–620. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0617](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0617)
- Erslev, E. A., & Rogers, J. (1993). Basement-cover geometry of Laramide fault-propagation folds. *Schmidt, C.J., Chase, R., and Erslev, E.A., (Eds.), Laramide Basement Deformation in the Rocky Mountain Foreland of the Western United States: G.S.A. Special Paper, 280*, 125–146.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. (Cambridge University Press, Ed.). New York.
- Gálvez, O., Gonzalez, A., & Bertin, J. (2016). *Impacto de la incertidumbre de clasificación de recursos en diseños mineros y planes de producción*.
- Garrido, M., Navarro, F., Ortiz, J., & Moreira, J. (2016). Resource assessment with unfolding methodology: a case study. In *6th International Conference on Innovation in Mine Operations (MININ2016)*. Santiago: Gecamin Publications.

- Giambiagi, L., Ghiglione, M., Cristallini, E., & Bottesi, G. (2009). Características estructurales del sector sur de la faja plegada y corrida de Malargüe (35°-36°S): Distribución del acortamiento e influencia de estructuras previas. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 65(1), 140–153.
- Gibbs, A. D. (1983). Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 5(2), 153–160. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(83\)90040-8](https://doi.org/10.1016/0191-8141(83)90040-8)
- Gratier, J. P., & Guillier, B. (1993). Compatibility constraints on folded and faulted strata and calculation of total displacement using computational restoration (UNFOLD program), 15.
- Gratier, J. P., Guillier, B., Delorme, A., & Odonne, F. (1991). Restoration and balance of a folded and faulted surface by best-fitting of finite elements: principle and applications. *Journal of Structural Geology*, 13(1), 111–115. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90107-T](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90107-T)
- Hardy, S., & Ford, M. (1997). Numerical modeling of trishear fault propagation folding and associated. *Tectonics*, 16(5), 841–854.
- Horna, S., Bennis, C., Borouchaki, H., Delage, C., & Rainaud, J. F. (2010). Isometric Unfolding of Stratigraphic Grid Units for Accurate Property Populating - Mathematical Concepts. *Ecmor Xii*, (September 2010), 12.
- Hossack, J. R. (1979). The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction: A review. *Journal of the Geological Society*, 136(6), 705–711. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.136.6.0705>
- Jamison, W. R. (1987). Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. *Journal of Structural Geology*, 9(2), 207–219. <https://doi.org/10.7554/eLife.05565>
- Jolliffe, I. T. (2002). Principal Component Analysis. Second Edition. *Springer Series in Statistics*, 98, 487. <https://doi.org/10.2307/1270093>
- Luo, Z. Q., Xiao-ming, L., Jia-hong, S., Ya-bin, W., & Wang-ping, L. (2007). Deposit 3D modeling and application. *Journal of Central South University of Technology*, 14, 225–229.
- Maerten, L., & Maerten, F. (2006). Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically based restoration: Technique and industry applications. *AAPG Bulletin*, 90(8), 1201–1226. <https://doi.org/10.1306/02240605116>
- Maretto, H., & Zavala, C. (2005). MODELADO DE RESERVORIOS: LOS AFLORAMIENTOS COMO MODELO BASE A UTILIZAR EN SUBSUELO, EJEMPLO EN SEDIMENTOS EÓLICOS DE LA FM. TORDILLO. In *6º Congreso Argentino de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*.
- Marshak, S., & Woodward, N. (1988). Introduction to cross-section balancing.
- Mcclay, K. R., Buchanan, P. G., & Oex, E. T. W. (1992). Thrust faults in inverted extensional basins E3 IZA. *Thrust Tectonics*, 93–104.

- Moretti, I. (2008). Working in complex areas: New restoration workflow based on quality control, 2D and 3D restorations. *Marine and Petroleum Geology*, 25(3), 205–218. <https://doi.org/10.4324/9781315392783>
- Moretti, I., Letouzey, V. D. J., & Calvo, a O. J. C. (2006). The Use of Surface Restoration in Foothills Exploration : Theory and Application to the Sub-Andean Zone of Bolivia. *Thrust Belts and Foreland Basins*, (2003), 149–162. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69426-7_8
- Navarro, F., Baeza, D., Herreros, D., & Valencia, M. (2016). Calculating ore resources on complex geology using a geometric restitution methodology: from modeling to the estimation. *Conference of Underground Mining*.
- Niemeyer, H. (1999). Apuntes De Geología Estructural Primera Parte: Estructuras Frágiles. Retrieved from https://www.u-cursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/geologia_estructural_-_hans_niemeyer.pdf
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine Learning en Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Poblet, J. (2004). Geometría y cinemática de pliegues relacionados con cabalgamientos. *Trabajos de Geología*, 24(May 2004), 127–146.
- Poblet, J., & McClay, K. (1996). Geometry and Kinematics of Single-Layer Detachment Folds. *AAPG Bulletin*, 7(7), 1085–1109.
- Poudret, M., Bennis, C., & Rainaud, J. (2011). A Volume Flattening Methodology for Geostatistical. *Methodology*, 1–4.
- Powell, V., & Lehe, L. (2012). Principal Component Analysis. Retrieved from <http://setosa.io/ev/principal-component-analysis/>
- Prevost, M., Lepage, F., Durlofsky, L. J., & Mallet, J.-L. (2005). Unstructured 3D gridding and upscaling for coarse modelling of geometrically complex reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 11(4), 339–345. <https://doi.org/10.1144/1354-079304-657>
- Priego de los Santos, J. E., & Porres de la Haza, M. J. (2002). La triangulación de delaunay aplicada a los modelos digitales del terreno. *Universidad Politécnica de Valencia*. Retrieved from http://www.age-geografia.es/tig/docs/doc1_8.pdf
- Rich, J. L. (1934). Mechanics of low-angle overthrust faulting as illustrated by Cumberland thrust block, Virginia, Kentucky, and Tennessee. *AAPG Bulletin*, 1584-1596.
- Rouby, D., Xiao, H., & Suppe, J. (2000). 3-D Restoration of Complexly Folded and Faulted Surfaces Using Multiple Unfolding Mechanisms, Delphine Rouby, Hongbin Xiao, and John Suppe. *AAPG Bulletin*, 84(6), 805–829.
- Santi, M. R., Campos, J. L. E., & Tecgraf, L. F. M. (2002). A Finite Element Approach for Geological Section Reconstruction. *Proceedings of the 22th ...*, 1–13.

- Soto, F., Garrido, M., Díaz, G., & Silva, C. (2017). Rapid Multivariate Resource Assessment. In *Geomin Mineplanning. 5° International Seminar on Geology for Mining Industry. 5° International Seminar on Mine Planning*.
- Suppe, J. (1983). Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, 283(7), 684–721. <https://doi.org/10.2475/ajs.283.7.684>
- Suppe, J., & Medwedeff, D. A. (1990). Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 83, 409–454.
- Tang, P., Wang, C., & Dai, X. (2017). A Newton-CG Augmented Lagrangian-Based Finite-Element Method for Three-Dimensional Restoration of Geological Models. *International Journal of Geomechanics*, 9(17), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000930](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000930).
- Wang, C. C. L., Smith, S. S., & Yuen, M. M. F. (2002). Surface flattening based on energy model. *Computer-Aided Design*, 34(11), 823–833.
- Williams, G. D., Kane, S. J., Buddin, T. S., & Richards, A. J. (1997). Restoration and balance of complex folded and faulted rock volumes: Flexural flattening, jigsaw fitting and decompaction in three dimensions. *Tectonophysics*, 273(3–4), 203–218. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00282-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00282-X)
- Xiao, H., & Suppe, J. (1992). Origin of Rollover. *AAPG Bulletin*, 76(4), 509–529.
- Ziesch, J., Tanner, D. C., & Krawczyk, C. M. (2014). Strain Associated with the Fault-Parallel Flow Algorithm During Kinematic Fault Displacement. *Mathematical Geosciences*, 46(1), 59–73. <https://doi.org/10.1007/s11004-013-9464-3>

A. Eventos de deformación casos

A.1 Pliegue por flexura de falla modelado por cizalle simple

CASOS	EVENTO (m)	Dip/Dir
Plano Transporte		
1	80	90/95.12
2	50	90/274.89
3	100	90/71.51
4	60	90/266.1
5	50	90/247.7

A.2 Pliegue por flexura de falla modelado por flujo paralelo a la falla

CASOS	EVENTO (m)	Dip/Dir
Plano Transporte		
6	80	90/95.12
7	60	90/274.56
8	150	90/83.81
9	50	90/295.44
10	50	90/247.7

A.3 Pliegue por flexura de falla modelado por trishear

CASOS	EVENTO (m)	Dip/Dir
Plano Transporte		
11	80	90/95.12
12	85	90/90
13	60	90/274
14	100	90/71.51
15	50	90/295.44

A.4 Anticlinal de *rollover* modelado por cizalle simple

CASOS	EVENTO (m)	Dip/Dir
Plano Transporte		
11	80	90/95.12
12	85	90/90
13	60	90/274
14	100	90/71.51
15	50	90/295.44

A.5 Anticlinal de *rollover* modelado por flujo paralelo a la falla

CASOS	EVENTO (m)	Dip/Dir
Plano Transporte		
16	80	90/95.12
17	30	90/264
18	60	90/93.8
19	80	90/138.57
20	50	90/267.88

A.6 Anticlinal de *rollover* modelado por trishear

CASOS	EVENTO (m)	Dip/Dir
		Plano Transporte
21	30	90/264.1
22	60	90/93.8
23	EI: 50 EII:30	90/270
24	70	90/259.4
25	80	90/138.57

- EI: primer evento, EII: segundo evento

A.7 Anticlinal de *rollover* por trishear

CASOS	EVENTO (m)	Dip/Dir
		Plano Transporte
26	50	90/270
27	30	90/264.1
28	50	90/275.12
29	70	90/259.4
30	40	90/100.16

A.8 Pliegue de propagación por cizalle simple

CASOS	EVENTO I (m)	Dip/Dir	EVENTO II (m)	Dip/Dir
	Izq/Der	Plano Transporte I	Izq/Der	Plano Transporte II
31	10/10	90/90.89	5/5	90/89.41
32	15/15	90/266.46	10/10	90/266.35

33	5/5	90/93.4	15/15	90/92.81
34	10/10	90/64.13	5/5	90/276.02
35	10/10	90/97.66	10/10	90/93.17

A.9 Pliegue por propagación por flujo paralelo a la falla

CASOS	EVENTO I (m)	Dip/Dir	EVENTO II (m)	Dip/Dir
	Izq/Der	Plano Transporte I	Izq/Der	Plano Transporte II
36	10/10	90/89.98	-	-
37	5/5	90/93.4	15/15	90/92.81
38	10/10	90/260.93	10/10	90/272.87
39	10/10	90/64.13	5/5	90/276.02
40	10/10	90/97.66	10/10	90/93.17

A.10 Pliegue por propagación por trishear

CASOS	Evento (m)	Dip/Dir	Tasa propagación/slip	Evento II (m)	Dip/Dir	Tasa Propagación/slip	Ángulo de trishear
	Izq/Der	Plano Transporte		Izq/Der	Plano Transporte		Izq/Der°
41	20/20	90/89.73	0.5	10/20	90/89.48	0.5	50/50
42	20/50	90/266.84	0.3	50/20	90/266.35	0.3	50/50
43	60/30	90/96.16	0.5	-	-	-	50/50
44	35/30	90/87.36	1.5	40/45	90/86.26	0.5	EI:40/40 EII:40/45
45	0/50	90/94.64	1	20/20	90/91.31	0.5	EI:30/30 EII:50/50

- EI: primer evento, EII: segundo evento

B. Estadísticas de variación casos de estudio Métrica Vector de Traslación

B.1 Pliegue por flexura de falla por cizalle simple

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]
1	21600	6.03	0.75	4.6204	5.32	6.08	6.78	7.1681
2	21600	2.42	0.30	1.9054	2.16	2.43	2.69	2.8528
3	21600	5.53	0.62	4.5875	5.02	5.45	5.96	6.8738
4	21600	2.56	0.83	1.6114	1.93	2.27	3.01	5.2794
5	21600	1.56	0.18	1.2899	1.41	1.54	1.70	1.9342

B.2 Pliegue por flexura de falla por flujo paralelo a la falla

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]
6	21600	6.77	1.54	4.5409	5.72	6.18	7.52	10.6586
7	21600	2.13	0.37	1.6867	1.94	2.03	2.14	5.2510
8	21600	3.12	0.82	1.7748	2.21	3.29	3.85	5.2476
9	21600	3.03	0.52	2.1702	2.61	3.00	3.28	5.3751
10	21600	1.53	0.17	1.2401	1.42	1.53	1.59	3.0106

B.3 Pliegue por flexura de falla por trishear

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]
11	21600	7.04	2.12	4.4036	5.73	6.52	7.79	25.5994
12	21600	7.45	1.89	5.2805	6.59	7.14	8.03	27.6029
13	21600	7.89	0.72	7.2991	7.37	7.55	8.22	13.4182

14	21600	5.17	1.00	3.6925	4.63	5.06	5.64	26.9847
15	21600	2.92	0.56	1.9997	2.46	2.89	3.20	5.3324

B.4 Anticlinal de *rollover* por cizalle simple

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]
16	18796	3.66	0.67	2.3412	3.18	4.06	4.06	8.3682
17	34610	4.09	1.45	2.6282	3.09	3.40	4.64	12.3477
18	18434	1.79	0.18	1.4036	1.62	1.77	1.96	3.8954
19	17536	1.13	0.64	0.3743	0.59	0.98	1.55	3.3427
20	32096	2.96	0.96	1.8246	2.31	2.80	5.08	9.3247

B.5 Anticlinal de *rollover* por flujo paralelo a la falla

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]
21	34610	7.27	1.02	6.1461	6.75	6.97	7.73	16.7740
22	18434	3.75	0.39	2.8966	3.35	3.85	4.15	5.0227
23	21731	1.69	0.85	0.9861	1.18	1.39	1.56	7.5346
24	15780	6.56	0.98	5.5042	5.87	6.18	7.17	16.4218
25	17536	3.34	1.54	1.8302	2.07	2.49	4.87	7.6473

B.6 Anticlinal de *rollover* por trishear

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]
26	18796	7.97	1.05	5.9466	7.46	8.00	8.53	18.6227
27	18296	7.19	1.02	6.0739	6.69	6.90	7.60	17.0270

28	21320	2.78	0.51	2.0959	2.41	2.75	3.08	10.9375
29	15780	6.47	0.98	5.4558	5.80	6.11	7.04	16.5525
30	13464	6.95	0.72	5.0133	6.46	7.23	7.54	8.7177

B.7 Pliegues por propagación de falla por cizalle simple

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]
31	21600	5.42	1.46	3.5587	4.04	4.99	6.59	9.7298
32	21600	11.21	2.05	9.0707	9.88	10.66	11.87	19.0252
33	21600	7.02	2.18	4.1318	4.92	6.88	8.67	12.6396
34	21600	7.12	1.44	5.0882	6.17	6.80	7.67	31.2085
35	21600	8.17	1.79	5.7047	7.15	7.77	8.92	15.7480

B.8 Pliegues por propagación de falla por flujo paralelo a la falla

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]
36	21600	3.23	1.25	2.1812	2.42	2.91	3.44	9.1656
37	21600	6.34	1.64	4.9610	5.47	5.77	6.10	12.2578
38	21600	9.87	0.94	8.9000	9.42	9.58	9.95	13.9825
39	21600	6.13	0.85	4.6732	5.55	5.98	6.55	11.0185
40	21600	7.54	1.32	5.8307	6.92	7.20	7.91	14.2922

B.9 Pliegues por propagación de falla por trishear

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]
41	21600	13.64	1.62	10.7088	12.43	13.54	14.54	21.6913

42	21600	24.16	1.96	19.2386	23.70	24.40	24.91	36.3483
43	21600	13.65	6.34	3.0054	8.30	12.84	18.48	28.1897
44	21600	17.11	3.60	13.1769	15.89	16.18	16.98	39.9907
45	21600	18.20	2.13	14.8668	16.63	17.72	19.44	24.7587

C. Estadísticas de precisión casos de estudio Métrica Vecinos más Cercanos

C.1 Pliegue por flexura de falla por cizalle simple

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]	Índice
1	21600	0.18	0.14	0	0.09	0.13	0.28	0.6999	528
2	21600	0.06	0.03	0	0.04	0.05	0.08	0.2414	179
3	21600	0.12	0.05	0	0.09	0.11	0.15	0.4294	361
4	21600	0.10	0.05	0	0.06	0.09	0.13	0.3353	310
5	21600	0.03	0.02	0	0.02	0.03	0.04	0.3102	105

C.2 Pliegue por flexura de falla por flujo paralelo a la falla

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]	Índice
6	21600	0.24	0.20	0	0.10	0.16	0.42	0.9428	735
7	21600	0.08	0.08	0.0018	0.03	0.06	0.10	0.7185	265
8	21600	0.10	0.07	0.0164	0.04	0.07	0.13	0.5171	294
9	21600	0.14	0.08	0.0001	0.08	0.13	0.20	0.5749	437
10	21600	0.06	0.05	0	0.02	0.05	0.09	0.5274	195

C.3 Pliegue por flexura de falla por trishear

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]	Índice
11	21600	0.52	0.85	0	0.12	0.36	0.49	9.3387	1515
12	21600	0.50	0.95	0.0434	0.14	0.22	0.43	8.4119	1456
13	21600	0.18	0.48	0.0001	0.04	0.07	0.12	5.3098	541
14	21600	0.27	0.4	0.0029	0.10	0.19	0.30	6.0114	795
15	21600	0.13	0.07	0	0.07	0.12	0.18	0.5849	399

C.4 Anticlinal de *rollover* por cizalle simple

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]	Índice
16	18796	0.11	0.23	0	0.00	0.00	0.17	3.2533	292
17	34610	0.15	0.19	0	0.09	0.12	0.14	3.4827	712
18	18434	0.04	0.05	0	0.03	0.03	0.05	0.7761	119
19	17536	0.06	0.04	0	0.04	0.05	0.07	0.8867	154
20	32096	0.11	0.10	0	0.06	0.09	0.13	1.2939	505

C.5 Anticlinal de *rollover* por flujo paralelo a la falla

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]	Índice
21	34610	0.27	0.34	0	0.06	0.13	1.09	2.2042	668
22	18434	0.07	0.11	0	0.03	0.04	0.08	1.9739	201
23	21731	0.08	0.13	0	0.02	0.03	0.09	2.1708	264
24	15780	0.24	0.31	0	0.07	0.13	0.28	2.7124	529
25	17536	0.13	0.15	0	0.05	0.10	0.17	3.8000	321

C.6 Anticlinal de *rollover* por trishear

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]	Índice
26	18796	0.20	0.37	0	0.05	0.06	0.10	2.8801	532
27	18296	0.26	0.33	0	0.06	0.13	0.29	2.2186	655
28	21320	0.11	0.25	0	0.03	0.04	0.10	3.7818	322
29	15780	0.24	0.31	0	0.07	0.13	0.28	2.7076	527
30	13464	0.19	0.22	0	0.03	0.08	0.31	1.6811	351

C.7 Pliegues por propagación de falla por cizalle simple

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]	Índice
31	21600	0.43	0.71	0	0.08	0.10	0.44	6.6781	1287
32	21600	0.59	1.24	0	0.04	0.04	0.30	7.6964	1741
33	21600	0.63	1.14	0	0.12	0.14	0.57	8.8396	1881
34	21600	0.44	0.83	0	0.06	0.09	0.38	20.7283	1304
35	21600	0.53	0.95	0	0.07	0.09	0.48	10.5469	1571

C.8 Pliegues por propagación de falla por flujo paralelo a la falla

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]	Índice
36	21600	0.30	0.60	0	0.06	0.07	0.11	4.4241	900
37	21600	0.49	0.89	0	0.09	0.10	0.55	6.8529	1447
38	21600	0.43	0.88	0	0.04	0.05	0.38	6.9286	1282
39	21600	0.31	0.58	0	0.03	0.04	0.31	4.8352	922
40	21600	0.43	0.71	0	0.07	0.09	0.45	6.7484	1278

C.9 Pliegues por propagación de falla por trishear

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]	Índice
41	21600	0.61	0.50	0	0.13	0.55	0.94	3.3969	1806
42	21600	0.93	1.03	0.0014	0.14	0.38	1.61	5.8773	2756
43	21600	0.61	0.69	0.0599	0.15	0.22	1.00	4.2001	1796
44	21600	0.83	0.78	0.0027	0.10	0.65	1.45	4.4209	2425
45	21600	0.75	1.26	0.0361	0.12	0.23	0.70	14.8022	2190

D. Estadísticas de caso mineralizado con Métrica Vecinos más Cercanos

Casos	Cantidad	Promedio [m]	Desviación estándar	Min [m]	25%	50%	75%	Max [m]	Índice
1	11346	0.27	0.16	0.0018	0.17	0.24	0.33	1.5013	419