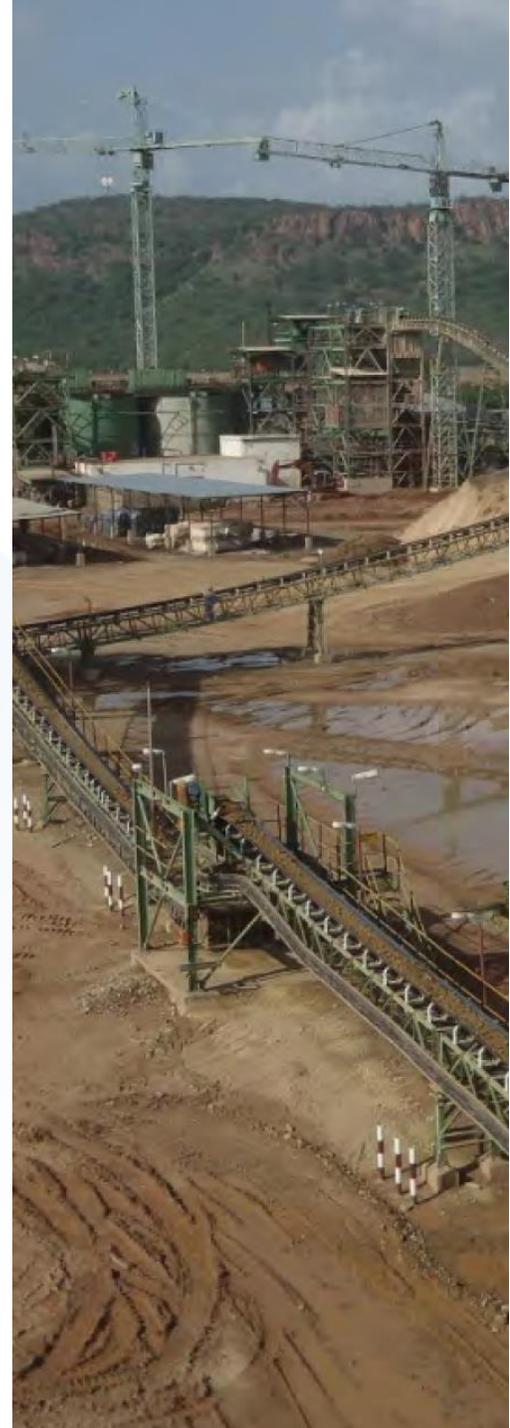


II SIMPOSIUM INTERNACIONAL DE KARST

Ensayo sobre la anisotropía del Sistema Kárstico en los Principales Proyectos Mineros en el Perú

Isaí Malvaceda Gallardo - Hydrogeologist

August, 2018



El Perú es el segundo productor mundial de cobre y el séxto de oro, y su actividad minera es clave para el desarrollo de la economía peruana.

2008 - 2017 : PRODUCCIÓN MUNDIAL DE COBRE POR PAÍS (MILLONES DE TMF)

PAÍS	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017 ^{1/}
TOTAL	15.60	16.04	16.15	16.13	16.88	18.26	18.44	19.13	20.14	19.76
CHILE	5.33	5.39	5.42	5.26	5.43	5.78	5.75	5.76	5.55	5.33
PERÚ	1.27	1.28	1.25	1.24	1.30	1.38	1.38	1.70	2.35	2.45
CHINA	1.09	1.07	1.20	1.31	1.59	1.72	1.78	1.71	1.90	1.86
ESTADOS UNIDOS	1.31	1.18	1.11	1.11	1.17	1.25	1.36	1.38	1.43	1.27
AUSTRALIA	0.89	0.85	0.87	0.96	0.91	1.00	0.97	0.97	0.95	0.92
CONGO	0.23	0.35	0.43	0.53	0.66	0.97	1.03	1.02	0.85	0.85
MÉXICO	0.25	0.24	0.27	0.44	0.50	0.48	0.52	0.59	0.75	0.76
ZAMBIA	0.53	0.70	0.69	0.66	0.70	0.76	0.71	0.71	0.76	0.76
INDONESIA	0.63	1.00	0.88	0.54	0.39	0.50	0.37	0.57	0.73	0.65
CANADÁ	0.61	0.49	0.53	0.57	0.58	0.63	0.67	0.70	0.71	0.62
OTROS	3.47	3.49	3.52	3.51	3.64	3.79	3.91	4.01	4.16	4.30

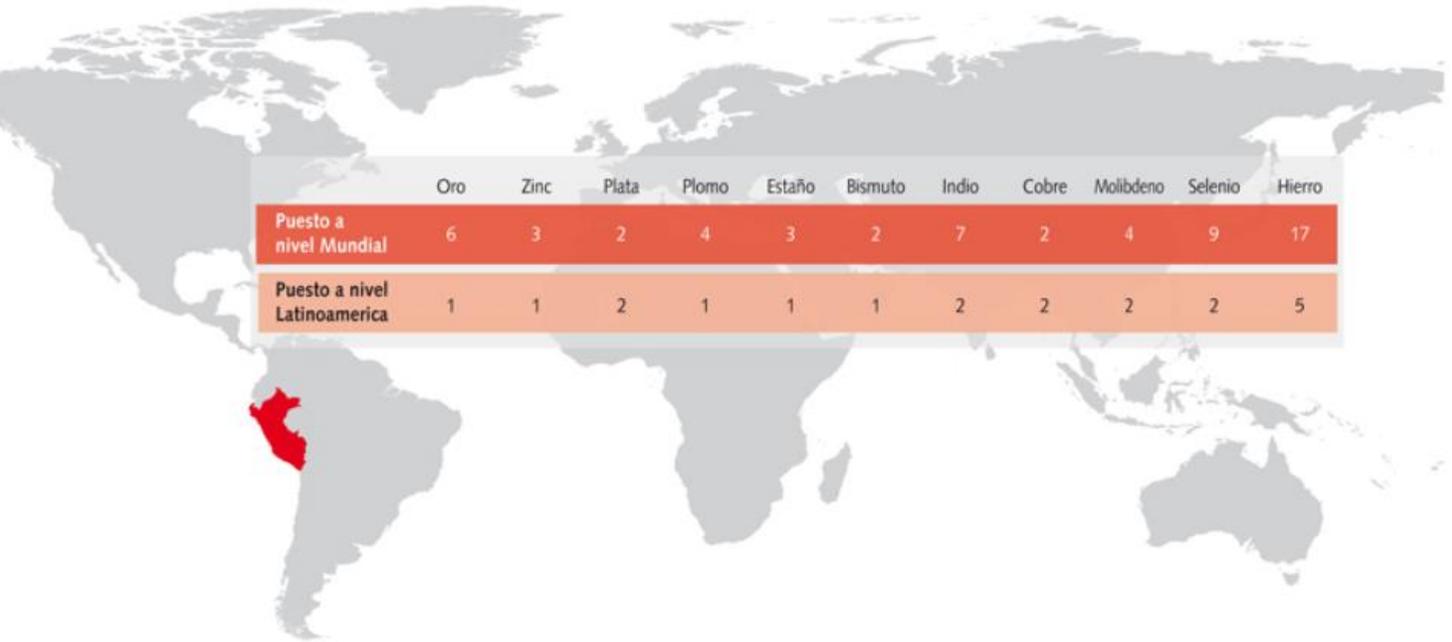
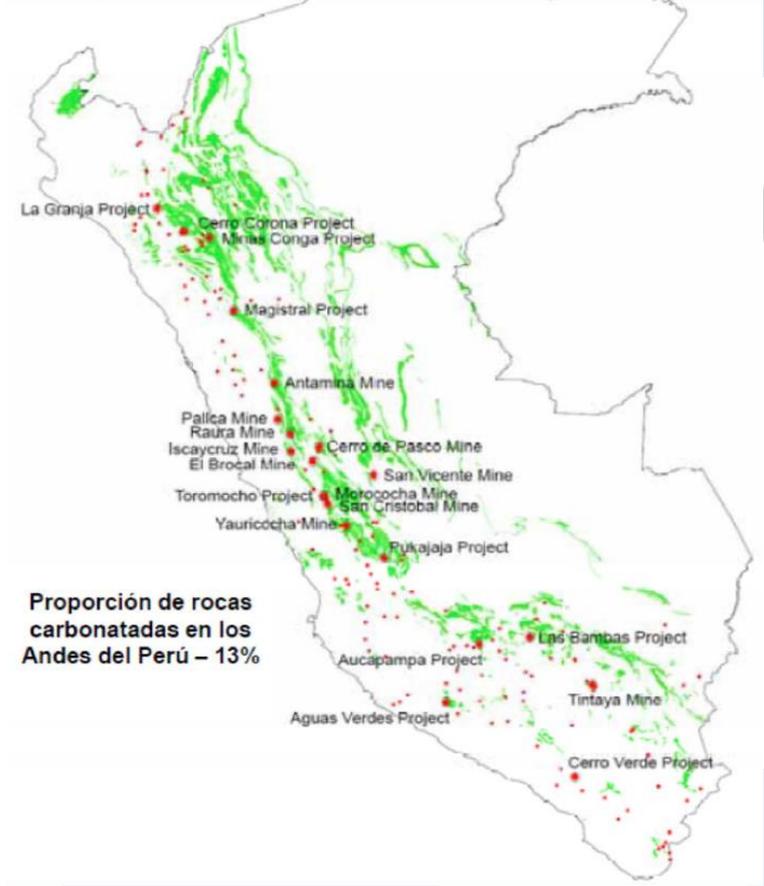


2008-2017: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ORO POR PAÍS (TMF)

PAÍS	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017 ^{1/}
TOTAL	2,296	2,484	2,579	2,677	2,752	2,922	3,015	3,097	3,109	3,146
CHINA	285	320	345	362	405	430	450	450	453	440
AUSTRALIA	215	224	261	260	252	268	274	278	290	300
RUSIA	172	193	189	200	218	230	249	252	253	255
ESTADOS UNIDOS	233	223	231	234	235	230	210	214	222	245
CANADÁ	95	97	102	103	107	124	151	153	165	180
PERÚ	180	184	164	166	162	151	140	147	153	151
SUDÁFRICA	213	198	189	180	155	160	152	145	145	145
MÉXICO	50	51	73	89	103	120	118	135	111	110
UZBEKISTÁN	85	90	90	91	93	98	100	102	102	100
BRASIL	55	60	62	65	67	80	81	81	85	85
GHANA	74	68	72	83	87	89	91	88	79	80
INDONESIA	64	140	106	78	69	60	69	97	80	80
KAZAJISTÁN	21	23	30	37	40	43	50	64	69	70
PAPÚA NUEVA GUINEA	67	64	63	62	59	54	58	60	62	60
OTROS	487	549	601	668	700	786	822	834	840	845



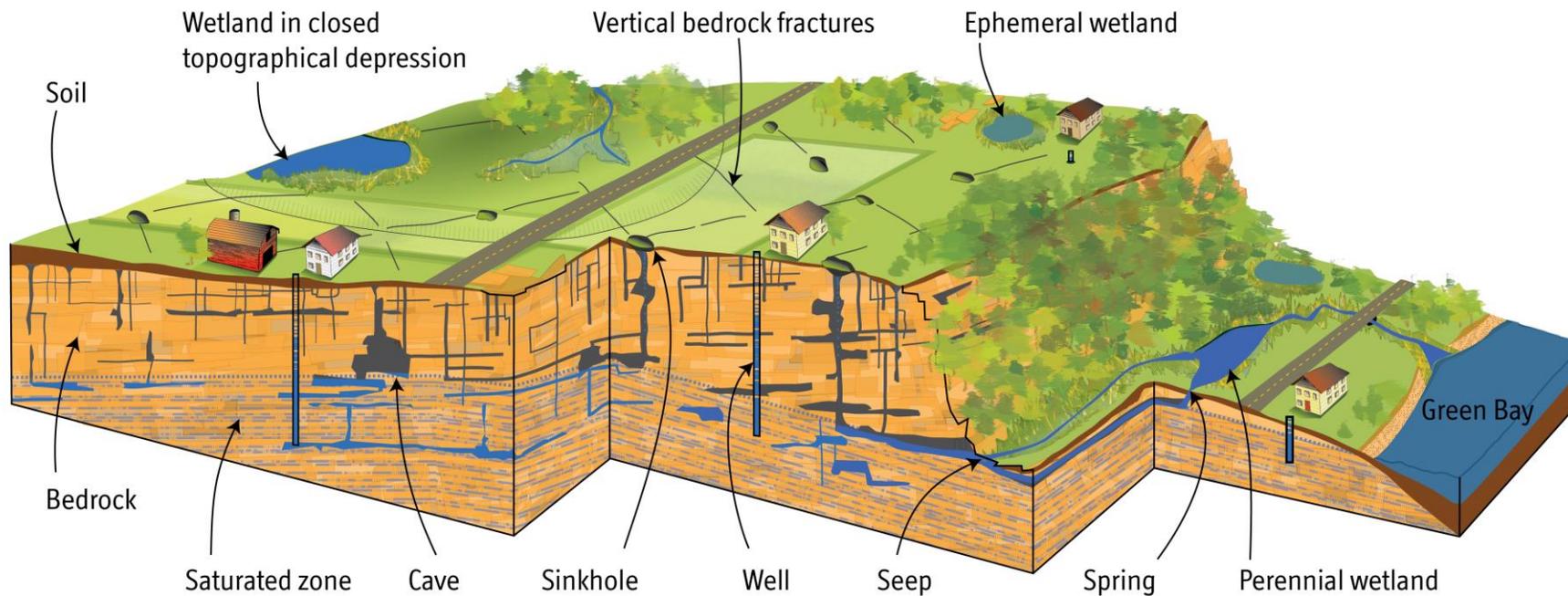
- En el Perú más del 50% de los proyectos mineros y minas de metales preciosos se encuentran en terrenos karsticos.



Durante el desarrollo y la construcción de estructuras mineras en regiones kársticas, en donde las condiciones desde un punto de vista del ingeniero civil son excelentes, se han presentado frecuentemente serios problemas hidrológicos.

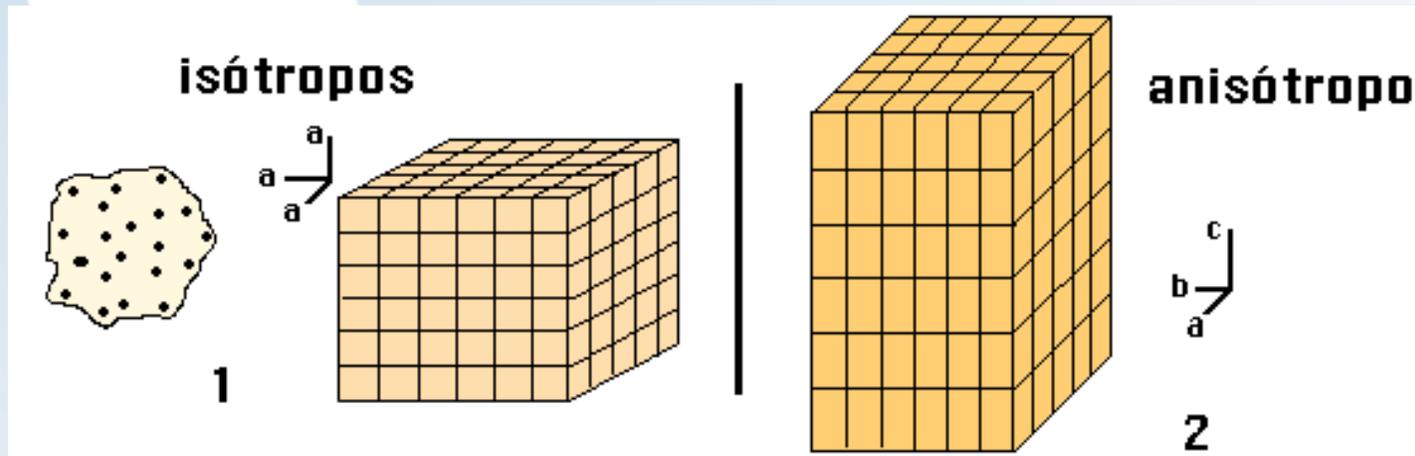


La actividad minera en estos entornos karsticos, requiere caracterizar el funcionamiento hidrogeológico del Sistema kárstico con especial referencia en la anisotropía del acuífero mediante el estudio de tectoglífos. Para lo cual se usa el método **Eraso** que consiste en predecir las direcciones de drenaje en el acuífero.



Anisotropía en sistemas kársticos

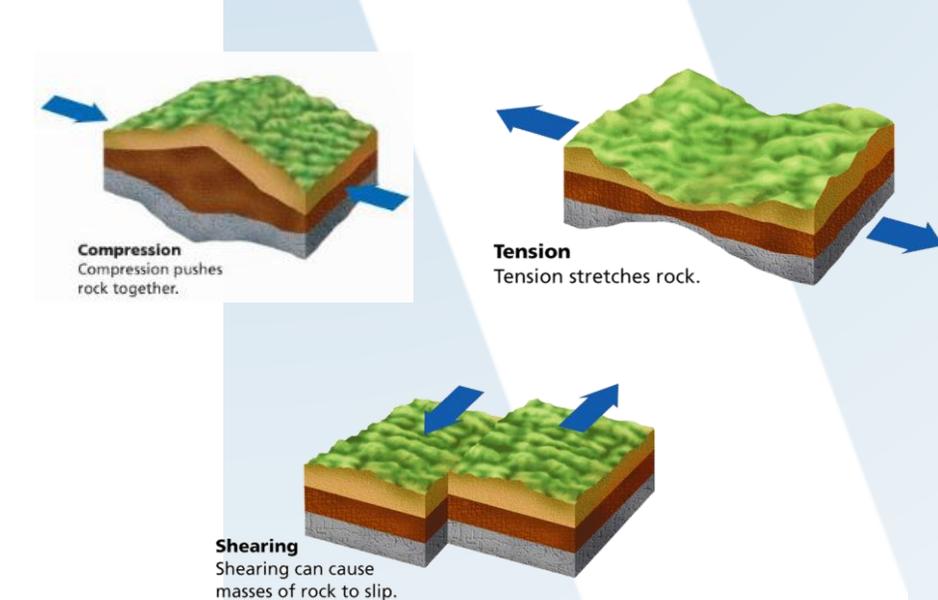
La anisotropía de un acuífero kárstico es consecuencia de su evolución tectónica y puede ser definida y cuantificada mediante el estudio de los tectoglifos (análisis microestructural). El método **Eraso** utiliza esta evaluación de la anisotropía para predecir las direcciones de drenaje en un acuífero kárstico.



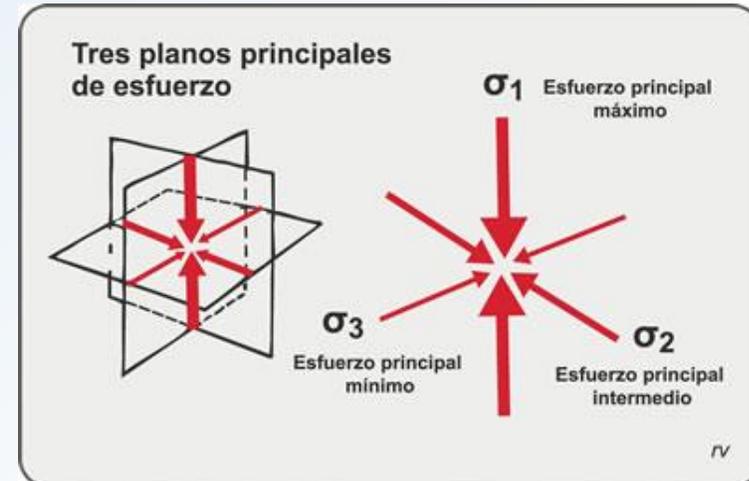
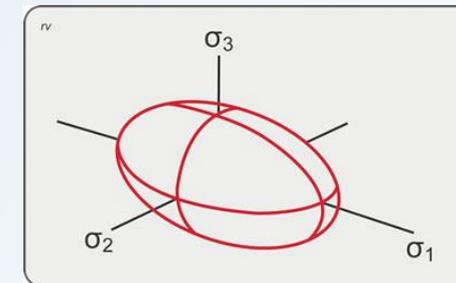
Tras una larga experiencia empírica e inductiva, Eraso (*op. cit.* y Eraso *et al.*, 1986) desarrolla y postula su **Método de Predicción de las Direcciones Principales de Drenaje en el Karst.**

Método de Predicción de las Direcciones Principales de Drenaje en el Karst

Existe una preparación tectónica del karst que prefigura la disposición de la red tridimensional de conductos de drenaje en función de su historia estructural.



Las direcciones más probables de drenaje se organizan dentro de los planos que contienen a las componentes máxima (σ_1) e intermedia (σ_2) de los diferentes elipsoides medidos, es decir, los planos ($\sigma_1 \sigma_2$)



Consideraciones de interés

La superficie visible del macizo rocoso no es el lugar que refleja mejor la estructura interna del sistema.

En la superficie existen numerosas fracturas que no son intrínsecas del macizo, sino a la condición de borde. Esto genera un gran “ruido estadístico”

Para ello, no se deben utilizar las direcciones de las diaclasas superficiales, ya que al ser consecuencia de reajustes tensionales de respuesta frágil (*no estando la mayoría de ellas generadas en el interior del macizo rocoso*)

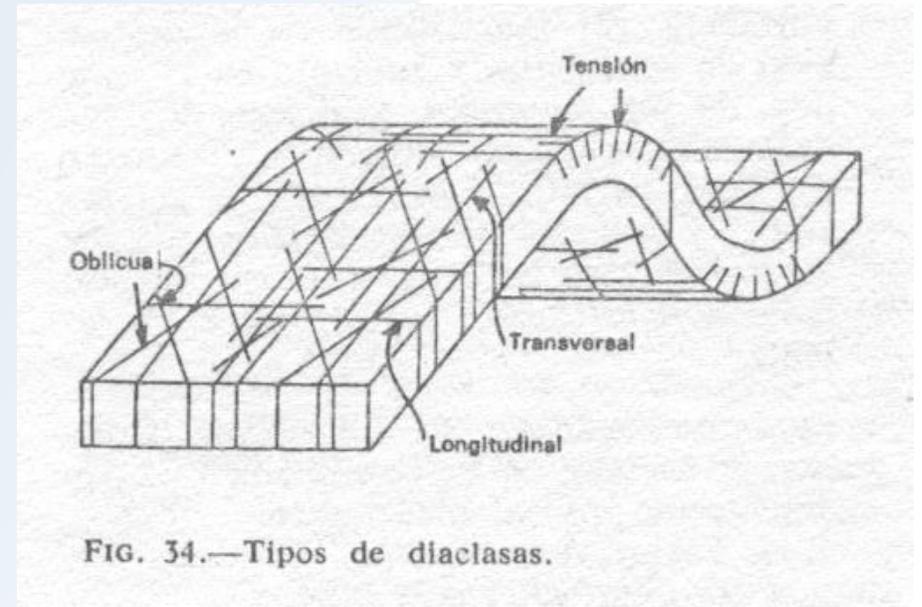
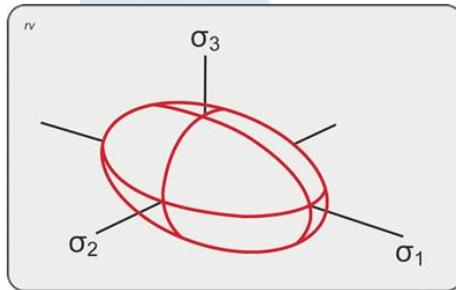


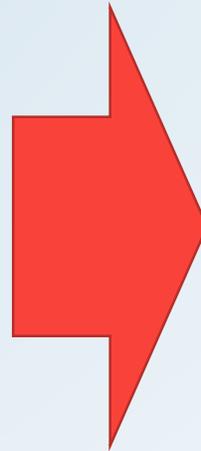
FIG. 34.—Tipos de diaclasas.

La aplicación del método

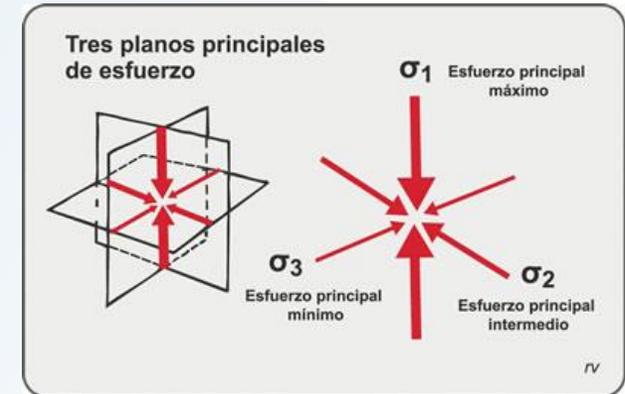
Medición sistemática de tectoglífos
en el sistema kárstico



Estados tensionales
(Elipsoide de esfuerzos)



La distribución de los diferentes planos
de drenaje (teóricos)



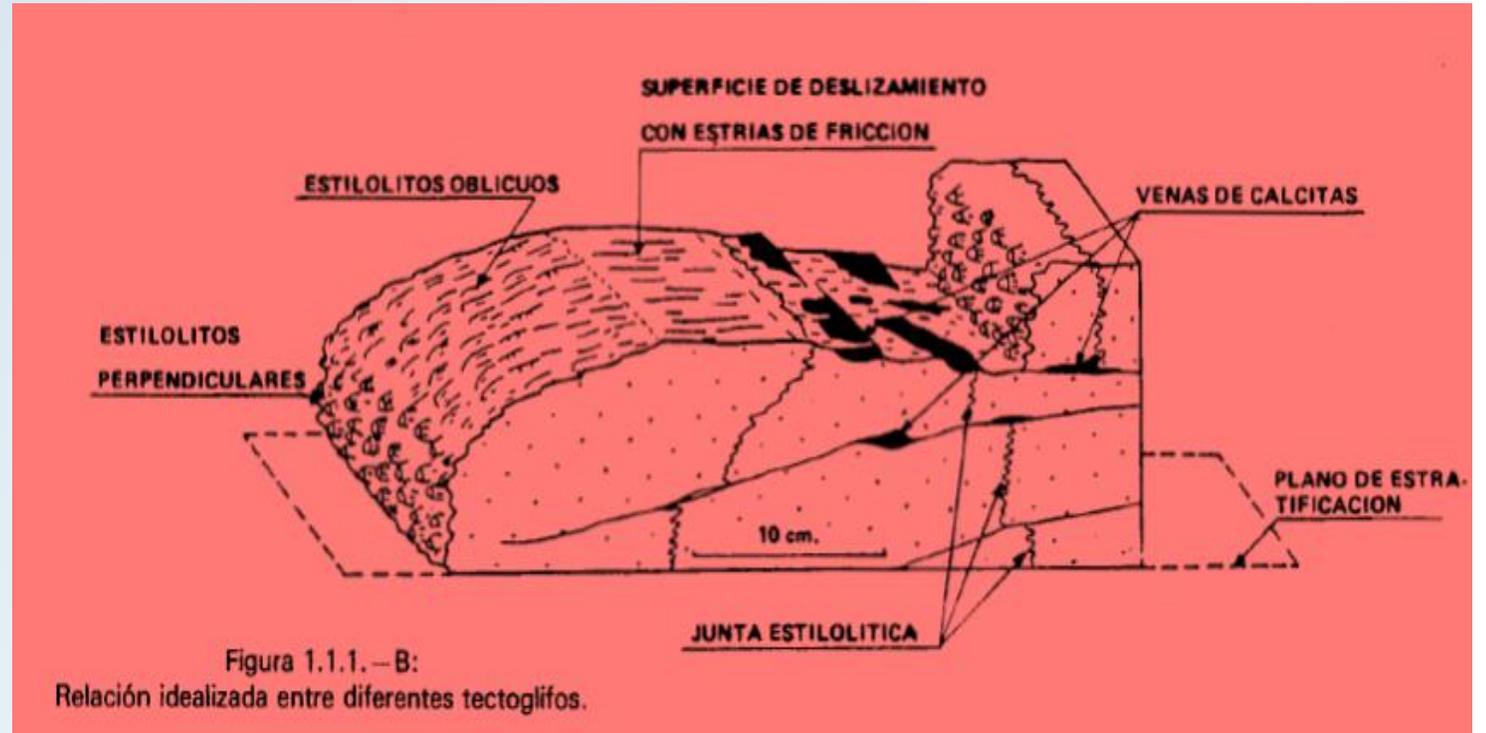
Las direcciones más probables de drenaje se organizan dentro de los planos que contienen a las componentes mayor σ_1 , e intermedia σ_2 de los diferentes elipsoides medidos, es decir, los planos ($\sigma_1 \sigma_2$). Son, por consiguiente, en cada caso, ortogonales a las componentes mínimas σ_3 de cada elipsoide en cuestión.

Tectoglifos

Conjunciones

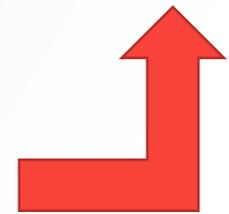
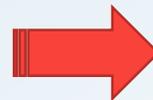
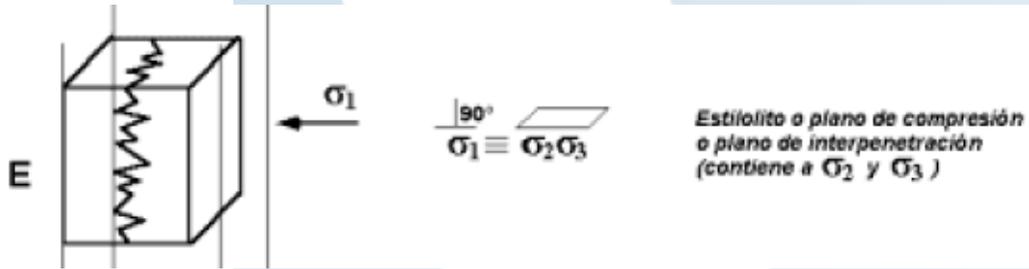


Interrelacionados genéticamente



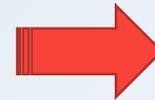
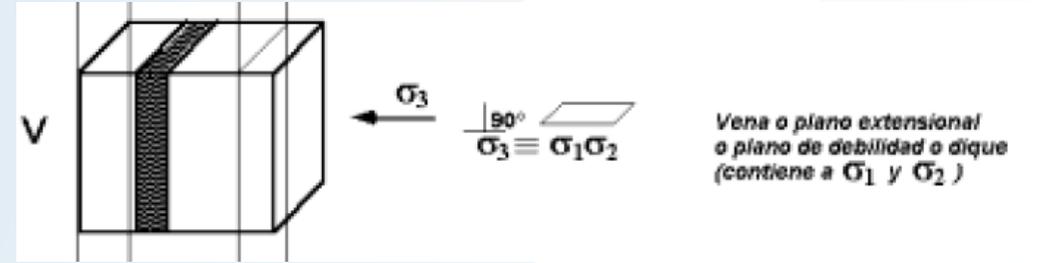
Estilolitos

Constituyen juntas de discontinuidad de la roca, donde las porciones de ambos lados de la roca se han aproximado entre sí, e interpenetrado, desapareciendo parte del material mediante un mecanismo de disolución bajo presión.



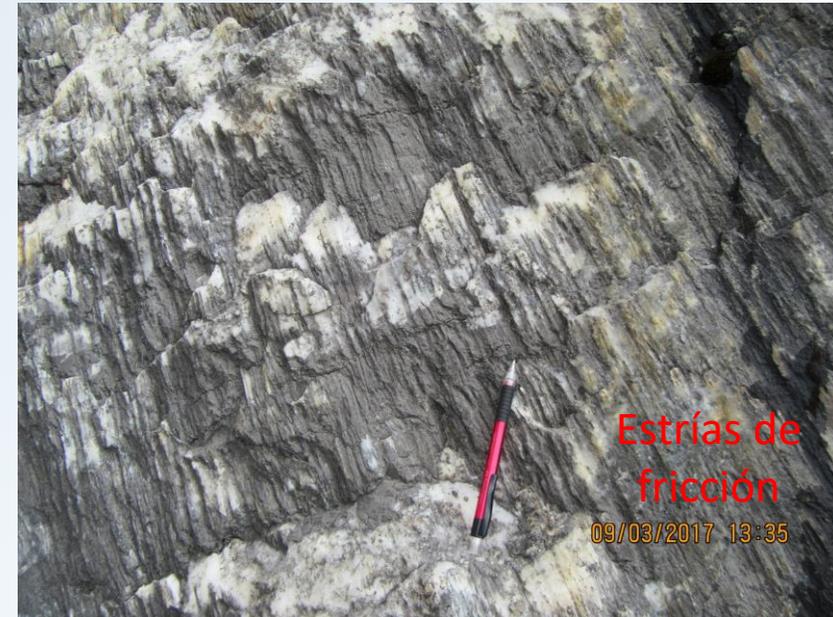
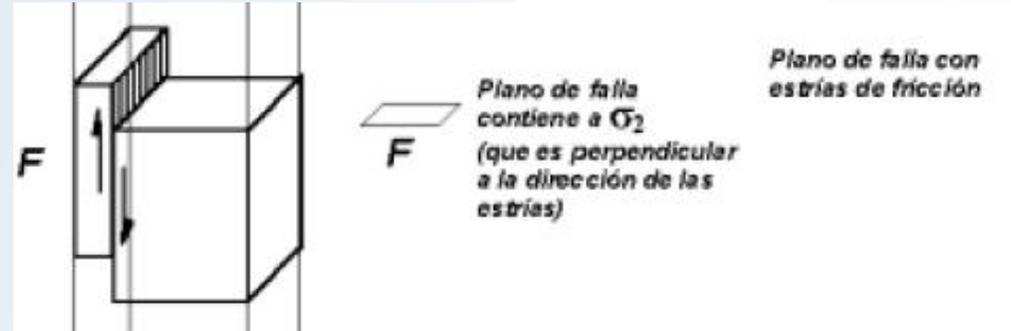
Venas de calcita

Constituyen juntas de discontinuidad en la roca, donde las porciones de ambos lados se han separado entre sí, al tiempo que el hueco se ha rellenado, en general, con recristalización del mineral dominante en la roca.



Estrías de fricción

En los planos de falla, indican que existe un deslizamiento definido por las estrías entre ambos lados de la falla como consecuencia de la existencia de determinadas componentes de cizalla, indicando por tanto que dicho plano de falla contiene σ_2 , En este caso el plano de falla forma un cierto ángulo α , con la componente mayor σ_1 del elipsoide



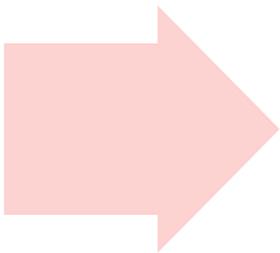
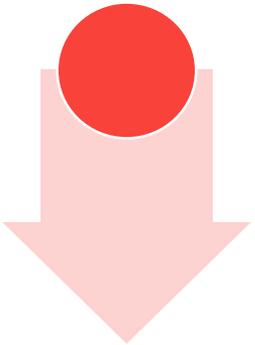
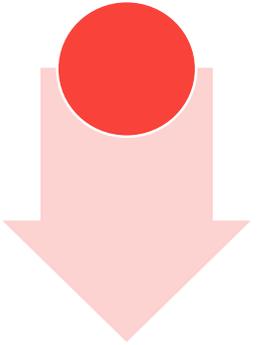
Trabajos de campo

El objetivo de este trabajo es aplicar el "Método de Predicción de las Direcciones Principales de Drenaje Subterráneo en Regiones Kársticas".

Cuantificación direccional de la anisotropía del macizo kárstico, en cuyos planos de debilidad (σ_1 , σ_2), se establecen los conductos de drenaje y las galerías donde se desarrollan las cavernas.

Datos de campo

Considerar estaciones micro-tectónicas en tramos rectilíneos 10 m y al menos 5 m de altura.



Análisis de resultados

Proyección
estereográfica

- Se definen los elipsoides ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), mediante las conjunciones de tectoglifos (EV,EF,VF,FF)



DIPS
Red de Wulff

Distribución
de polos

- Se definen los planos de debilidad estructural o planos de drenaje (σ_1, σ_2)



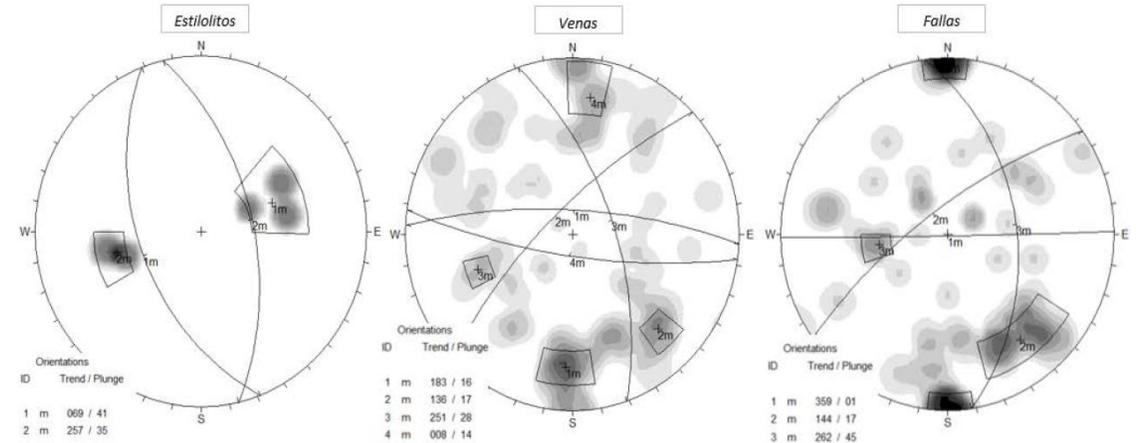
DIPS
Red de Schmidt

Histograma de
distribución

- Histogramas en dos dimensiones, relacionando en ordenadas el porcentaje de probabilidad, número de datos y rumbo.

Distribución de Polos de los Planos de drenaje

Distribución de densidad de polos, donde se definen las orientaciones estadísticamente representativas para cada tectoglifo.



Histograma de Distribución de los Planos de drenaje

Como salida gráfica se presenta un histograma de frecuencia de las direcciones de los planos de drenaje, relacionado en ordenadas el porcentaje de probabilidad (izquierda) y número de datos (derecha) y en abscisas el rumbo (sobre norte magnético)

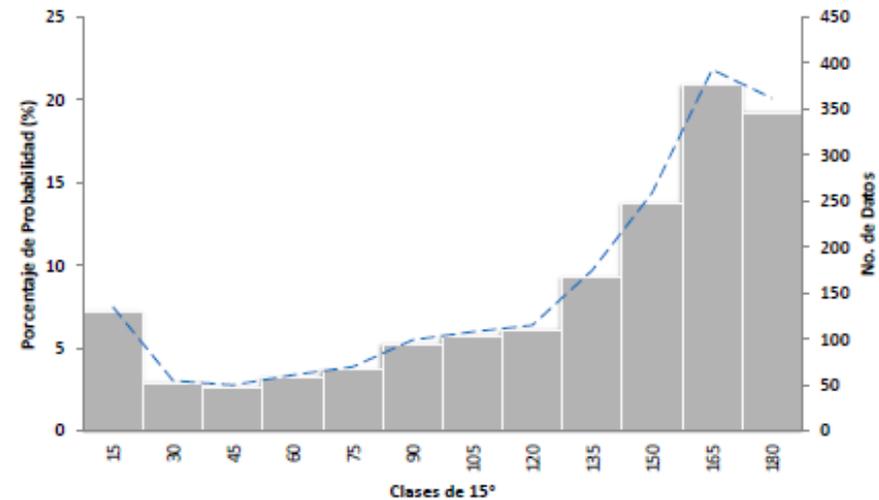


Figura 06: Histograma de probabilidad direccional para venillas en los sondajes

Análisis microestructural

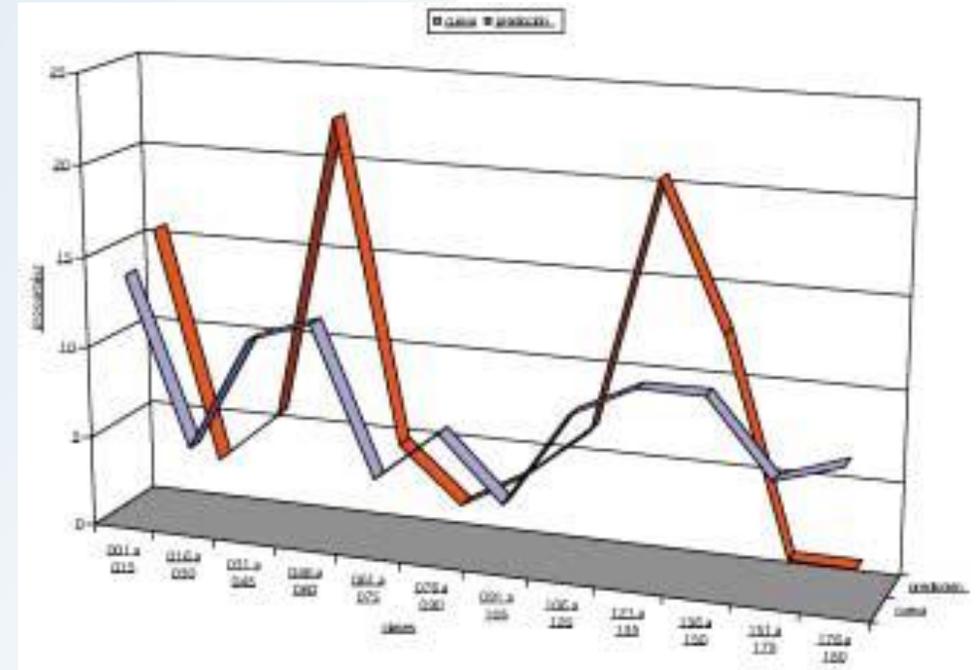
Los resultados del análisis microestructural (la predicción) son recogidos en un cuadro y se grafican en un estereograma.

Se observan las modas en torno a las direcciones principales

Se calcula el grado de acierto estadístico entre las predicciones y casos reales se aplica sistemáticamente el test de Kolmogorov, el cual determina el error máximo.

$$E_{max} \leq \frac{|c - p|}{\sqrt{n \text{ clases}}}$$

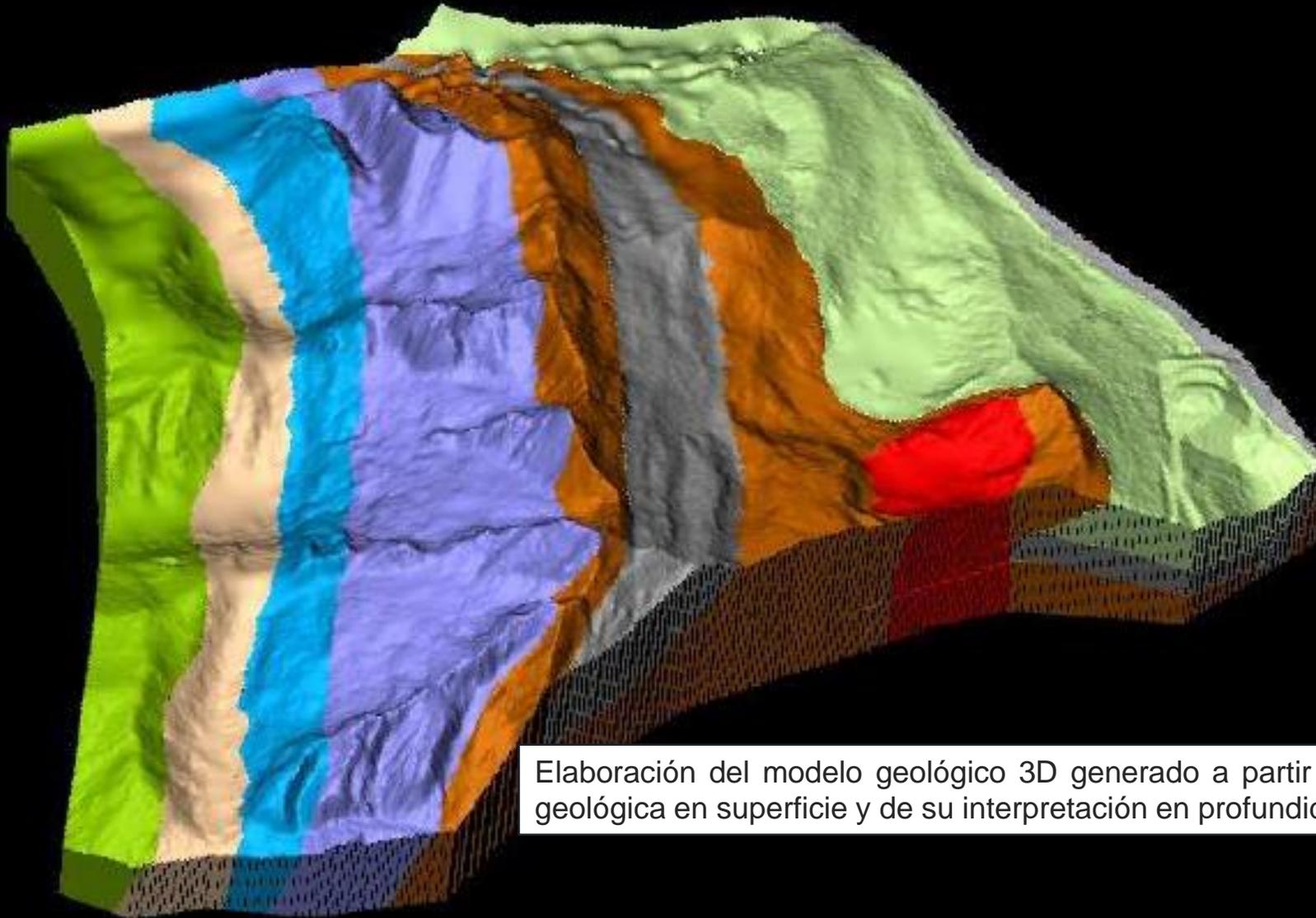
siendo c y p los valores porcentuales acumulados de los conductos reales y la predicción respectivamente.



General discrete

Copy of Modelo_Irregular_grid

- Fm. Cathuz
- Fm. Parahuaca
- JU-1
- JU-2
- JU-3
- JU-4
- JU-3
- Ce
- JU-4
- JU-3
- JU-4
- JU-3
- Cuarzo Monzorit



Elaboración del modelo geológico 3D generado a partir de la cartografía geológica en superficie y de su interpretación en profundidad.

Simulación de conductos kársticos. El cálculo de los conductos se basa en el principio simple que establece que los conductos seguirán las vías del mínimo esfuerzo a través de la geometría en 3D del sistema a la vez que representa las heterogeneidades internas y las ubicaciones de las entradas y salidas.

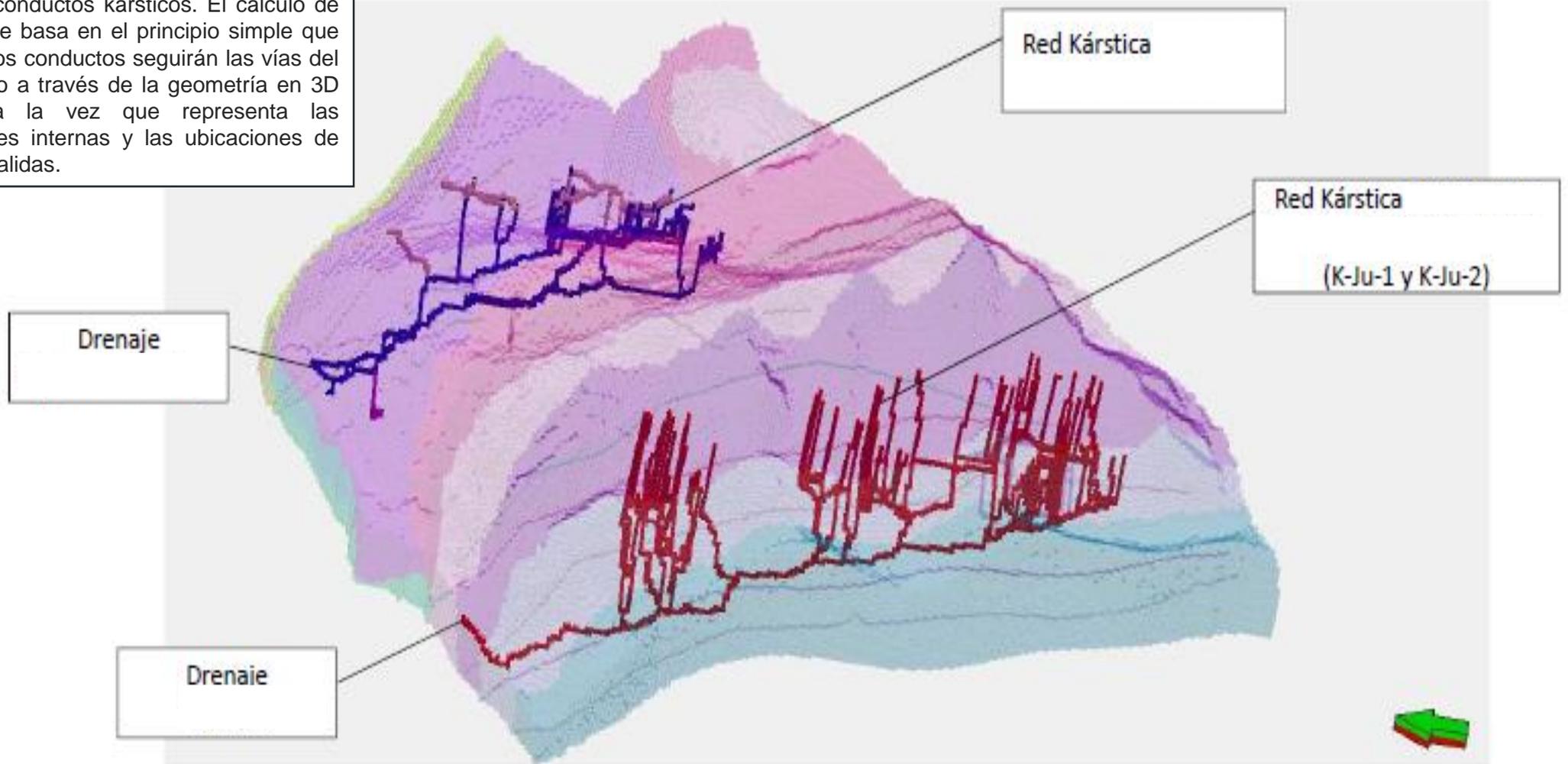
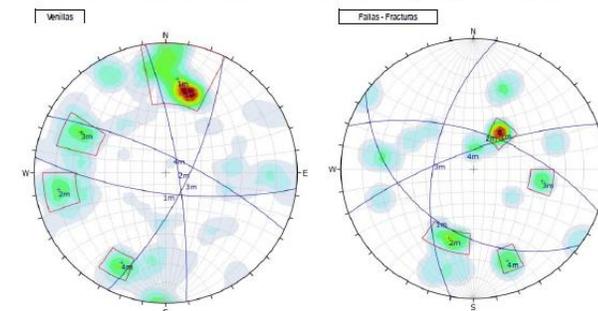




Tabla 3: Componentes principales del elipsoide de deformación y plano de drenaje

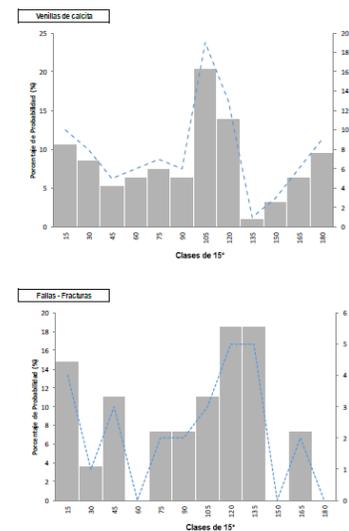
Conjunción	$\sigma 1$ (T/P)	$\sigma 2$ (T/P)	$\sigma 3$ (T/P)	Plano de Drenaje (Azimut/Dip)
V1-F1	128°/58°	268°/26°	7°/18°	N97°/72°SW
V1-F2	225°/68°	101°/13°	7°/18°	N97°/72°SW
V1-F3	108°/31°	252°/53°	7°/18°	N97°/72°SW
V1-F4	118°/47°	263°/37°	7°/18°	N97°/72°SW
V2-F1	12°/61°	165°/26°	261°/11°	N171°/79°NE
V2-F2	165°/29°	10°/59°	261°/11°	N171°/79°NE
V2-F3	145°/66°	355°/21°	261°/11°	N171°/79°NE
V2-F4	167°/18°	21°/69°	261°/11°	N171°/79°NE
V3-F1	49°/49°	192°/35°	296°/19°	N26°/71°SE
V3-F2	195°/29°	54°/54°	296°/19°	N26°/71°SE
V3-F3	75°/66°	201°/15°	296°/19°	N26°/71°SE
V3-F4	193°/34°	50°/50°	296°/19°	N26°/71°SE
V4-F1	49°/74°	298°/6°	206°/15°	N116°/75°NE
V4-F2	82°/64°	302°/20°	206°/15°	N116°/75°NE
V4-F3	105°/35°	315°/51°	206°/15°	N116°/75°NE
V4-F4	114°/7°	359°/73°	206°/15°	N116°/75°NE

Gráfico 1: Diagrama de distribución de densidad de polos para tectoglifos



Se realizaron conjunciones entre venas de calcita y fallas-fracturas, obteniéndose los vectores de las componentes principales del elipsoide de deformación y la dirección probable de drenaje (Tabla 3) que se organiza dentro del plano que contiene a los componentes mayor ($\sigma 1$) e intermedio ($\sigma 2$), siendo ortogonal a la componente menor ($\sigma 3$).

Gráfico 2: Diagrama de probabilidad de las direcciones de las estructuras principales



Conclusión

El análisis de probabilidad, de direcciones, para estas estructuras principales se realizaron entre venillas de calcita (N= 93) y fallas-fracturas (N=27).

- Para venas de calcita se obtuvo una mayor probabilidad con un 20% en la clase N90°- N105°: dirección preferencial Este-Oeste.
- Para fallas-fracturas se obtuvo una mayor probabilidad con un 18.5 % en las clases N105°- N120° y N120°- N135: dirección preferencial NO-SE



Tabla 02: Componentes principales del elipsoide del total de datos

Conjunción	σ_1 (T / P)	σ_2 (T / P)	σ_3 (T / P)	Plano Drenaje (A / D)
E1-V1	257 / 34	160 / 11	035 / 71	145 / 36O
E1-V2	251 / 19	358 / 42	147 / 44	053 / 47N
E1-E1	252 / 16	081 / 74	343 / 02	073 / 88S
E2-F1	065 / 51	315 / 15	214 / 35	124 / 55N
E1-F2	253 / 18	346 / 10	107 / 71	017 / 19O
E2-F2	064 / 52	164 / 08	260 / 37	170 / 53E
E1-F3	252 / 16	093 / 73	345 / 06	075 / 84S
E2-F3	064 / 52	240 / 38	331 / 02	061 / 88E
F1-F2	146 / 14	000 / 73	238 / 09	148 / 81E
F1-F3	279 / 18	090 / 72	188 / 03	098 / 87N
F2-F3	025 / 01	123 / 82	295 / 08	025 / 82N
V1-F1	217 / 35	313 / 08	055 / 54	145 / 36O
V1-F2	261 / 33	164 / 13	055 / 54	145 / 36O
V1-F3	148 / 03	240 / 36	055 / 54	145 / 36O
V2-F1	235 / 02	327 / 48	143 / 43	053 / 47O
V2-F2	246 / 14	350 / 44	143 / 43	053 / 47O
V2-F3	346 / 45	244 / 12	143 / 43	053 / 47O

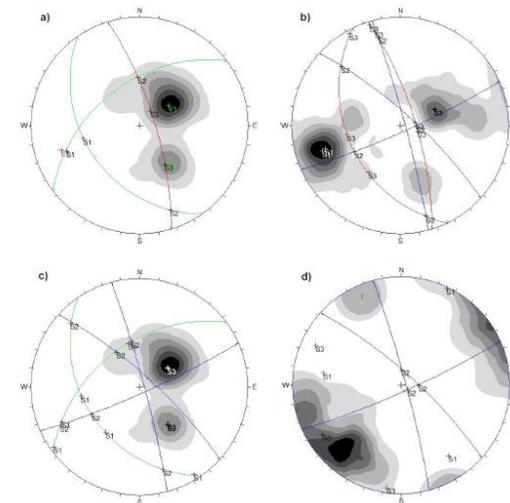


Figura 03: Definiciones de los elipsoides de deformación, considerando orientaciones estadísticas representativas, donde las cruces en negro representan cada eje componente. a) Conjunción E-V, estilote en rojo, venillas en verde, fondo distribución de polos de venillas; b) Conjunción E-F, las fallas en azul, fondo distribución de polos de estilote; c) Conjunción V-F, fondo distribución de polos de venillas; d) Conjunción F-F, fondo distribución de polos de fallas

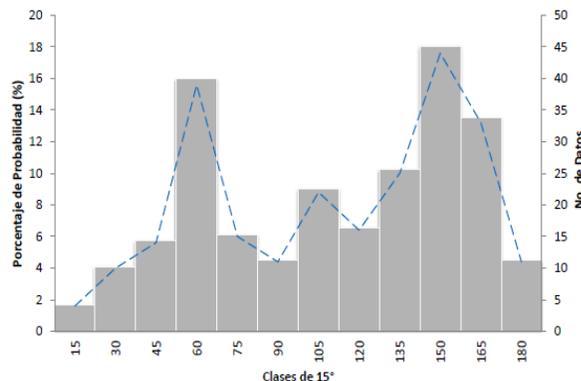


Figura 05: Histograma de probabilidad direccional de venillas para las estaciones geomecánicas

Conclusión

En base a datos estadísticamente representativos donde se observa la presencia de 03 modas direccionales principales que podrían configurar el karst de con las siguientes características:

- N135° -150° con 18.0% de probabilidad para la clase.
- N045°-060° con 16.0% de probabilidad para la clase.
- N090°-105° con un 9.0% de probabilidad para la clase.

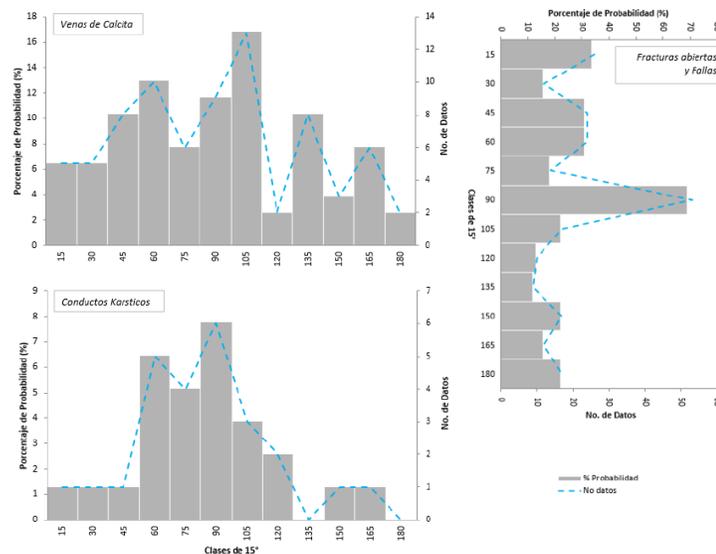
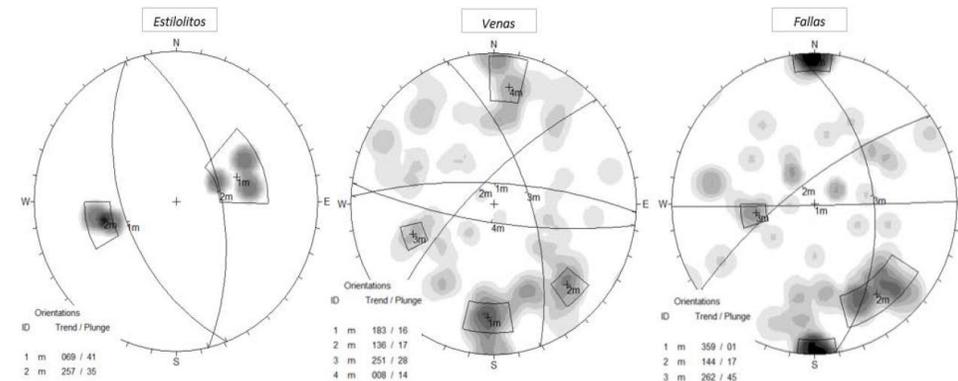


Tabla 4-2: Componentes principales del elipsoide de deformación y plano de drenaje

Conjunción	$\sigma 1$ (T/P)	$\sigma 2$ (T/P)	$\sigma 3$ (T/P)	Plano de Drenaje (A/D)
E1-V1	77°/44°	287°/42°	178°/20°	N272°/74°E
E1-V2	32°/36°	246°/49°	337°/11°	N225°/73°N
E1-V3	68°/62°	160°/11°	250°/50°	N341°/62°E
E1-V4	109°/38°	262°/49°	164°/6°	N098°/76°S
E2-V1	282°/31°	69°/55°	164°/3°	N272°/75°E
E2-V2	241°/42°	28°/44°	146°/26°	N225°/73°N
E2-V3	12°/46°	142°/31°	22°/40°	N340°/63°E
E2-V4	267°/38°	115°/48°	1°/19°	N098°/76°O
E1-F1	69°/41°	268°/48°	167°/9°	N257°/80°S
E1-F2	69°/41°	254°/49°	161°/3°	N250°/87°N
E1-F3	69°/41°	165°/77°	262°/48°	N353°/42°E
E2-F1	257°/35°	90°/54°	351°/6°	N081°/84°E
E2-F2	257°/35°	34°/47°	150°/22°	N241°/67°S
E2-F3	257°/35°	155°/15°	44°/51°	N137°/39°N
V1-F1	319°/70°	90°/13°	183°/16°	N273°/75°N
V1-F2	91°/6°	338°/74°	183°/16°	N273°/75°N
V1-F3	286°/41°	77°/44°	183°/16°	N272°/74°N
V2-F1	40°/18°	267°/65°	136°/17°	N226°/74°N
V2-F2	227°/16°	338°/74°	136°/17°	N226°/74°N
V2-F3	247°/49°	33°/35°	136°/17°	N226°/74°N
V3-F1	345°/9°	90°/60°	251°/28°	N340°/61°O
V3-F2	150°/19°	30°/55°	251°/28°	N340°/61°E
V3-F3	27°/53°	149°/21°	251°/28°	N340°/61°E
V4-F1	115°/51°	268°/35°	8°/14°	N098°/76°E
V4-F2	107°/33°	259°/53°	8°/14°	N098°/76°E
V4-F3	262°/46°	110°/41°	8°/14°	N098°/76°E
F1-F2	66°/27°	267°/61°	160°/9°	N250°/82°S
F1-F3	323°/32°	90°/44°	212°/29°	N303°/61°N
F2-F3	187°/50°	40°/37°	297°/16°	N027°/74°N

T= Trend, P= Plunge, A=Azimuth, D= Dip, E=Estilolito, V=Venilla, F=Falla. Fuente: WSP, 2016

Gráfico 4-2: Diagrama de distribución de densidad de polos para tectoglifos



Conclusión

Los resultados para estos tectoglifos (n=77) indican modas direccionales principales con las siguientes características:

N090°-105° con 41% de probabilidad para la clase: dirección preferencial Este-Oeste.

N150°-180° con 24% de probabilidad para la clase: dirección preferencial NNO-SSE.

N045°-075° con 21% de probabilidad para la clase: dirección preferencial NE-SO.



Tabla 4-4: Componentes principales del elipsoide de deformación y plano de drenaje

Conjunción	$\sigma 1$	$\sigma 2$	$\sigma 3$	Plano de Drenaje (Azimut/Dip)
	(T/P)	(T/P)	(T/P)	
E1-F1	N066°/32°	N209°/52°	N166°/15°	N054°/72°SE
E1-V1	N042°/36°	N218°/55°	N327°/14°	N039°/89°SE
E1-V2	N026°/69°	N166°/15°	N278°/53°	N170°/77°NE
E1-V3	N164°/62°	N319°/25°	N198°/46°	N144°/80°SO
E2-F1	N048°/7°	N313°/37°	N178°/79°	N047°/82°SE
E2-V1	N0219°/1°	N212°/83°	N318°/2°	N039°/89°SE
E2-V2	N358°/29°	N149°/57°	N314°/32°	N170°/77°NE

Fuente: WSP 2018.

Gráfico 4-1: Diagrama de distribución de densidad de polos para tectoglifos

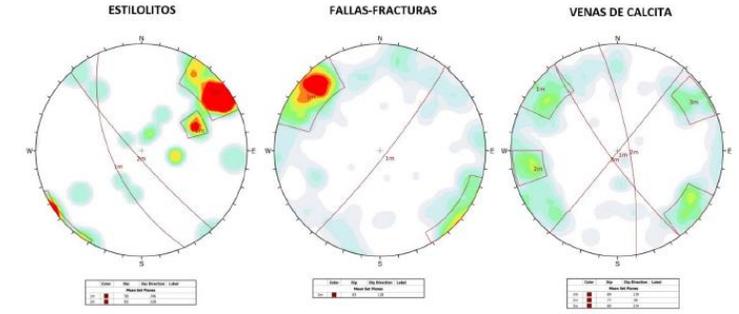
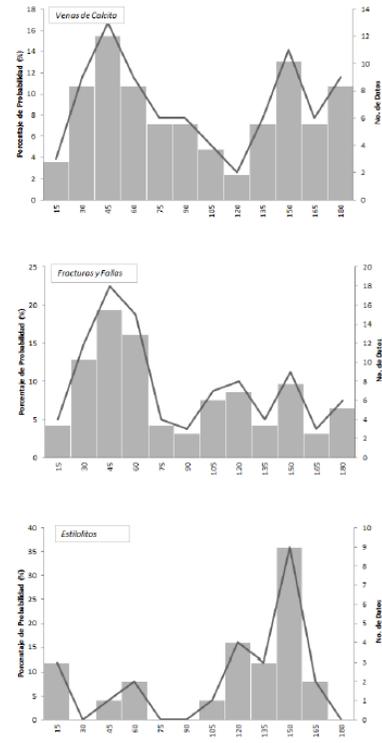


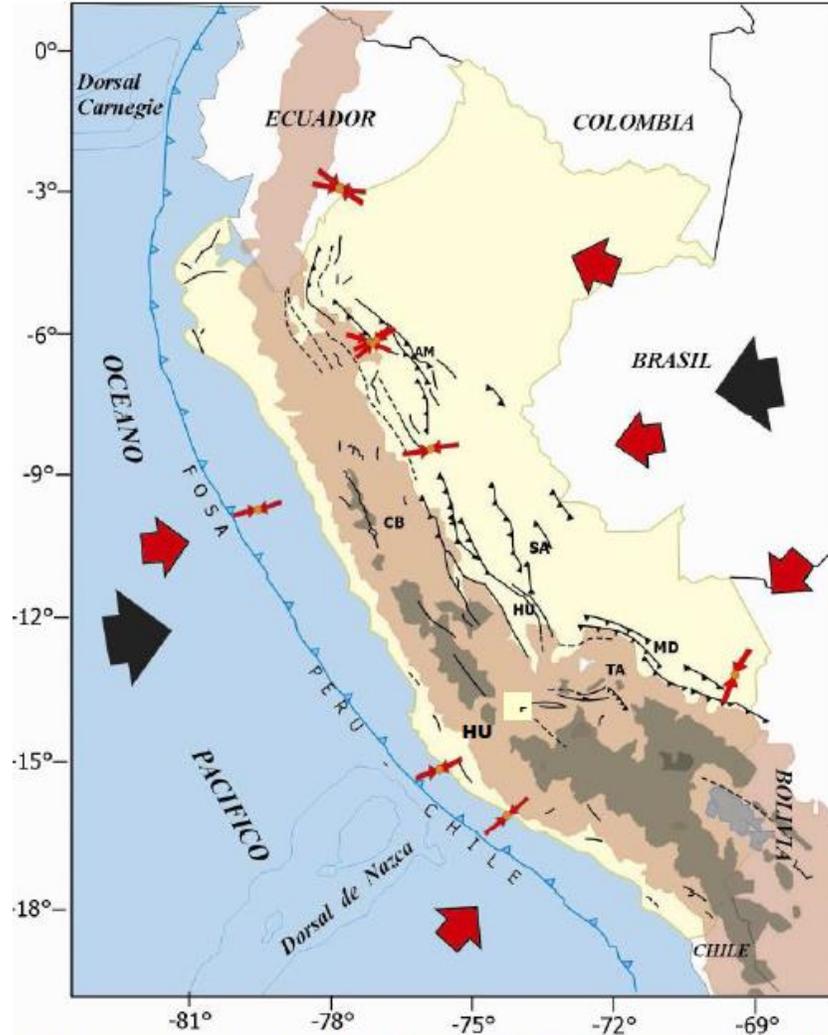
Gráfico 4-2: Diagrama de probabilidad de las direcciones de las estructuras principales



Conclusión

Los planos de drenaje de las calizas a partir del elipsoide de deformación comprenden una dirección principal de NE-SO y de manera secundaria una dirección de NNO-SSE. La dirección principal de drenaje es compatible con una de las direcciones de mayor probabilidad para las venas de calcita (N045°-060°) y concordante con la dirección de fallas normales presentes en la zona de estudio. Se debe considerar que el desplazamiento vertical podría colocar en yuxtaposición niveles con distinta permeabilidad.





Las flechas rojas pequeñas y grandes indican la dirección de la deformación local y regional. Las flechas negras corresponden a la dirección de convergencia de placas (Nazca y Sudamericana).

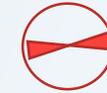
Instituto Geofísico del Perú Dr. Hernando Tavera 2014.



N90° - N105°



N135° - 150°



N090° - 115°



N045° - 060°

Conclusión

La mayor parte de las direcciones de drenaje en zonas kársticas tienen una relación inherente y temporal con la orogenia y se le atribuye a procesos relacionados a la subducción a profundidad.

Gracias por confiar en WSP!

wsp.com

wsp