

CUANDO LA INTEGRIDAD NO SE DEJA MEDIR: GESTIÓN DE LA CORROSIÓN BAJO DEPÓSITOS NO DETECTABLE POR MÉTODOS CONVENCIONALES

Gisella Candia Pluspetrol S.A. gcandia@pluspetrol.net, Ernesto Battaglia Pluspetrol S.A. ebattaglia@pluspetrol.net, Emanuel Marinaro Pluspetrol S.A. emarinaro@pluspetrol.net, Ligia Penzo Pluspetrol S.A. lpenzo@pluspetrol.net

1. Sinopsis

En junio de 2025 se produjo un evento no deseado (END) en la Troncal P del sistema de gathering, afectada por corrosión localizada en una soldadura circunferencial a la altura del PK9. La línea, que transportaba un fluido multifásico proveniente de hasta 24 pozos, operó durante seis años sin la posibilidad de ejecutar limpiezas internas periódicas debido a limitaciones en planta, favoreciendo la acumulación de sólidos y la acción corrosiva de los fluidos. Tras el evento, se ejecutó una limpieza mecánica exhaustiva mediante múltiples pasajes de polypigs y scrapers, seguida de una inspección ILI que reveló más de 19.000 anomalías, concentradas mayormente en los primeros kilómetros de la traza. El análisis metalúrgico, químico y de depósitos demostró la coexistencia de mecanismos sinérgicos de corrosión: CO₂, H₂S, O₂, cloruros, depósitos minerales y actividad microbiológica. Se identificaron diferencias marcadas entre los patrones de daño de las anomalías cercanas al inicio de la línea y la falla en PK9, influenciadas por topografía, composición del fluido, patrones de flujo y variabilidad del hold up de agua.

Paralelamente, se evaluaron tendencias incrustantes en troncales asociados y se seleccionaron tecnologías químicas óptimas para inhibición de incrustaciones, corrosión y control microbiológico. Los ensayos demostraron buena performance del inhibidor de corrosión vigente y la necesidad de mantener tratamientos continuos combinados con aplicaciones por batch.

El estudio permitió caracterizar integralmente el estado del ducto y establecer un cambio de paradigma en la gestión de integridad del sistema de gathering, destacando la importancia de limpiezas periódicas, monitoreo microbiológico avanzado, análisis de riesgo y programas integrales de inspección. Las acciones recomendadas buscan reducir la probabilidad de fallas futuras, optimizar la mantenibilidad operativa y prolongar la vida útil de los activos críticos del yacimiento.

2. Introducción

El 6 de Junio de 2025 aconteció un END en una línea troncal, conocida como Troncal P. Las características constructivas del ducto son las siguientes:

- API 5L PSL2 X70
- Espesor: 8 mm
- Diámetro: 12,75"
- Longitud: 10,75 km
- MAPO: 99 kg/cm²
- Fluido transportado: Mezcla multifásico (arena, agua, gas y condensado)

El sistema ha experimentado variaciones en su composición y caudales debido a la conexión intermitente de múltiples PADs. La concentración media de H₂S en gas es de 1,6 mg/L y la de CO₂ en gas de 0,25%. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las concentraciones de agentes disueltos en agua como CO₂ (>100 mg/L), trazas de H₂S y O₂, cloruros (>50.000 mg/L). Individualmente la potencialidad corrosiva del CO₂ y H₂S se presumiría baja.

PAD	Calcio Ca++ (mg/l)	Magnesi o Mg++ (mg/l)	Bario Ba++ (mg/l)	Hierro FeI (mg/l)	Cloruros Cl (mg/l)	Sulfatos SO4 (mg/l)	pH	Conducti vidad (mS/cm)	CO2 (mg/l)	SH2 (mg/l)	O2 (mg/l)	Dureza total mg/l CO3Ca	Dureza cálcica mg/l CO3Ca	Alcalinid ad pH 8,3 mg/l CO3Ca
3001	14028	2400	180	51	52057	275	6.09	91		0.10	0.01	45000	35000	130
G11	15197	1800	185	42	56395	279	6.26	129	146	0.01	0.04	46667	39167	190
G1	18512	1365	179	73	77272	124	6.11	140	143	0.02	0.03	57500	51250	73
G2	24230	1364	138	57	86734	346	5.92	153	146	0.06	0.04	65862	60000	95
C3	20044	1200	335	58	86075	123	6.17	134	105	0.00	0.05	55000	50000	165
C7	25040	2400	163	41	97605	363	6.23	161	100	0.10	0.05	72500	62500	168
G8	24956	1527	190	71	80452	42	6.01	811	154	0.06	0.04	68536	62273	116
G7	17034	1800	226	88	50681	216	6.05	108	138	0.04	0.03	50000	41875	163
K3	28467	1680	525	55	83191	38	6.06	138	154	0.06	0.03	78000	71000	90
K4	29392	1200	813	72	79421	29	5.72	149	160	0.00	0.09	78333	78333	120
K9	26052	2400	475	86	82758	38	5.84	150	160	0.10	0.10	75000	65000	160

Tabla 1. Historial de resultado de inoculación de cultivos de BSR y BPA en múltiples pozos del yacimiento.

La topografía del terreno promueve zonas de acumulación de agua y sólidos, así como sectores donde el flujo se canaliza, generando patrones diferenciados de ataque corrosivo (Figura 1).



Figura 1. Topografía del terreno. En rojo la falla PK9 y en amarillo las Anomalia #1 y #2.

También se cuenta con información bacteriológica (Figura 2), donde se indica la presencia de Bacterias Sulfato Reductoras (BSR) y Bacterias Productoras de Ácido (BPA) en diferentes muestreos del sistema.

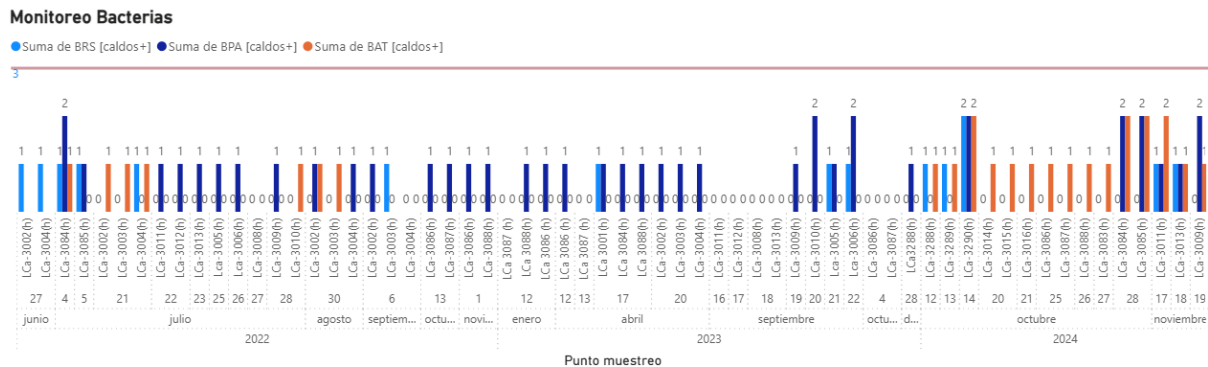


Figura 2. Análisis de bacterias periodo 2021-2025*.

*Nota: El conteo de bacterias se interpreta como cantidad de viales positivos (1 vial positivo ~ 10 bac./mL, 2 viales positivos ~ 100 bac./mL, 3 viales positivos ~ 1000 bac./mL, etc.)

El ducto en cuestión llevaba 6 años de operación (PEM 24/6/2019) a una presión de operación de 90 kg/cm² y una temperatura de 50 °C aproximadamente. La línea recolectaba la producción de 8 PADs que conforman 24 pozos productores en total y, a lo largo de su vida útil, llego a recolectar en más de 12 PADs. La línea fue diseñada como piggeable, con la intención de implementar un programa de limpieza regular. Sin embargo, debido a limitaciones en las instalaciones de planta, no era posible recibir el slug generado durante las operaciones de limpieza, lo que impidió su mantenimiento preventivo.

Bajo este contexto se produjo un evento no deseado (END) asociado a corrosión localizada (pitting) en una soldadura circunferencial a la altura del kilómetro 9,1 de la traza (de ahora en adelante PK9) (Figura 3).

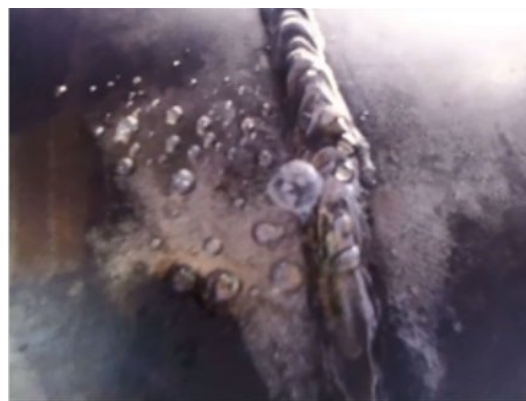


Figura 3. Pitting en costura circunferencial.

3. Desarrollo

3.1. Análisis de Integridad

Ante la falla (PK 9), se desarrolló una planificación de contingencia intensiva que incluyó el montaje de 16 piletas (10 en la trampa lanzadora y 6 en la receptora), la instalación de prefabricados para conexión entre trampas y piletas, y la logística de suministro de agua mediante camiones cisterna (Figura 4).



Figura 4. Montaje de piletas.

El proceso de limpieza se efectuó de forma progresiva, iniciando con polypigs de poliuretano de media densidad recubiertos con una capa polimérica, hasta alcanzar el uso de scrapers de discos con cepillo y placas calibradas (Figura 5). Este enfoque gradual se adoptó ante la incertidumbre sobre posibles depósitos o restricciones internas. En total se ejecutaron 12 pasajes de herramientas y dos intervenciones puntuales (una por el reemplazo del spool dañado y otra por oportunidad), completándose las tareas en un período de 15 días.



Figura 5. Polypigs y scrapers.

Posteriormente, alcanzado un grado de limpieza óptimo, se procedió al pasaje de la herramienta ILI. El análisis identificó más de 19.000 anomalías, concentrándose el 90% en los primeros 3 km de la traza (Figura 6). El punto de mayor pérdida de material observado fue del 56%, sin embargo, la elevada densidad de defectos agrupados generó zonas con altos concentradores de tensiones, los cuales resultan potencialmente críticas y pueden llevar a una falla prematura de la estructura.

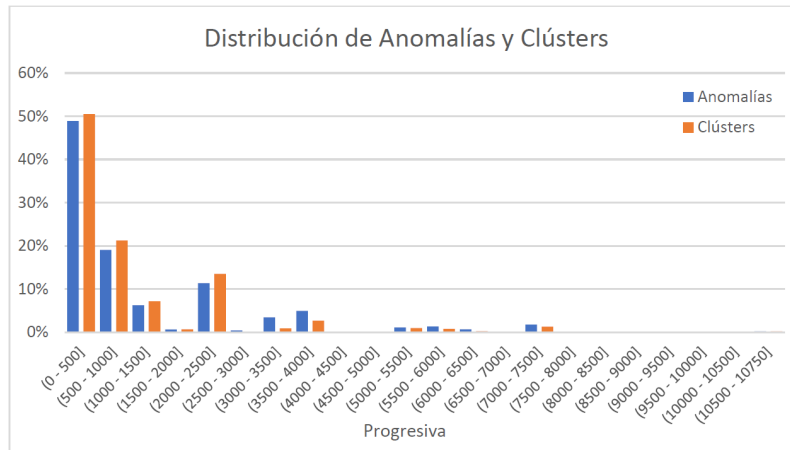


Figura 6. Distribución de anomalías.

La distribución de anomalías responde a la interacción entre topografía, composición, velocidad de flujo y presencia de sólidos. La inspección ILI demostró una concentración del 68% de las anomalías en los primeros 1.500 m, coincidente con zonas de mayor altitud y variabilidad altimétrica (Figura 7). Esta condición genera mayor turbulencia en la interfase agua-hidrocarburo, favoreciendo la ruptura de capas protectoras y la propagación de corrosión localizada distinto a lo observado desde el km 3 en adelante.

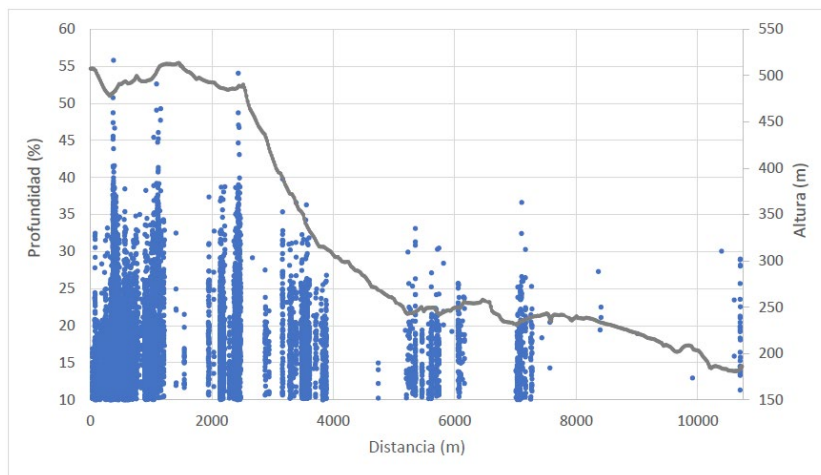


Figura 7. Distribución de anomalías vs altimetría.

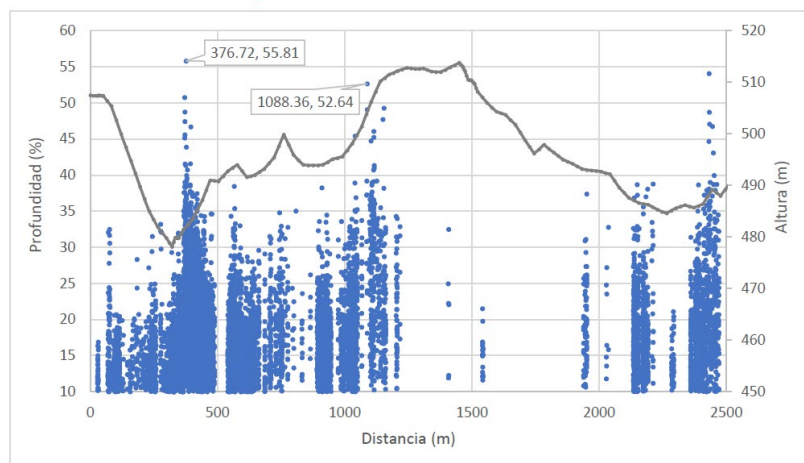


Figura 8. Distribución de anomalías en el tramo inicial.

3.2. Análisis de Falla

Las probetas metalográficas representativas de los primeros kilómetros (0km a 3km) evidenciaron defectos con geometría plana compatibles con corrosión por CO_2 , así como cavidades semiesféricas asociadas a pits coalescentes (Figura 9). En la anomalía #1 Figura 10, la superficie mostró múltiples zonas afectadas en posiciones 10:00 y 2:00, con bordes irregulares y pérdida de espesor significativa. Por otro lado, en la anomalía #2 Figura 11, presenta un surco longitudinal aproximadamente continuo, ubicado en la posición de hora 06:00, acompañado por sectores con daño localizado en sus inmediaciones y marcas de nivel de líquido (entre horas 05:00 y 07:00).



Figuras 9. Macrografías comparativas anomalía #1 y #2 respectivamente.

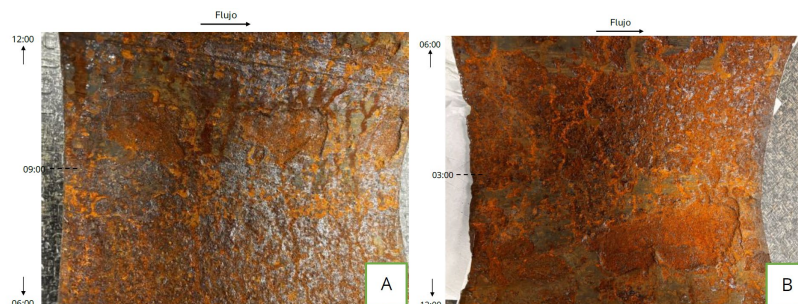


Figura 10. Anomalía #1. Se observa daño localizado en torno a hora 10:00 (A) y 2:00 (B).



Figura 11. Anomalía #2. Izquierda hora 6:00. Derecha hora 12:00.

Esta morfología de las anomalías correspondiente a los primeros kilómetros (Anomalía #1 y #2) son muy diferentes a las observadas en las indicaciones del kilómetro 3 en adelante, las cuales predominan

en los cordones de soldadura como lo observado en PK9, sin evidenciar corrosión generalizada como en las muestras anteriores (Figura 12).

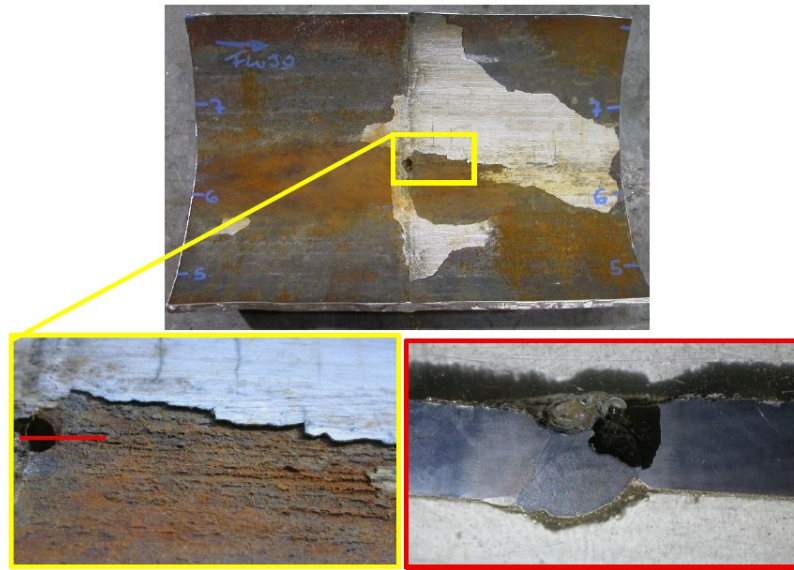


Figura 12. Imagen de la zona de Falla PK9, donde ocurrió el END.

Para el análisis de depósitos por DRX y FRX se extrajeron sólidos mediante raspado de las paredes internas de las piezas de anomalías #1 y #2. El detalle de las principales señales de difracción se resume en las Tablas 2 y 3. Las fases detectadas, en orden decreciente de intensidad difractada, son:

- Carbonato de Calcio y Magnesio
- Óxido de Calcio y Hierro
- Sulfuro de Hierro

Pos. [°2Th.]	Rel. Int. [%]	Fase
26,6553	42,28	FeO(OH)
29,5711	100	(Mg _{0.06} Ca _{0.94}) (CO ₃); FeS
31,7617	65,18	Ca ₄ Fe ₉ O ₁₇
35,3365	50,99	Fe ₃ O ₄ ; FeO(OH)
37,9354	14,05	FeO(OH)
39,6691	13,9	(Mg _{0.06} Ca _{0.94}) (CO ₃), FeO(OH); Ca ₄ Fe ₉ O ₁₇
42,0374	17,16	FeS
43,2718	22,02	(Mg _{0.06} Ca _{0.94}) (CO ₃), FeS
52,508	20,37	FeO(OH); FeS; Ca ₄ Fe ₉ O ₁₇
61,0902	18,22	(Mg _{0.06} Ca _{0.94}) (CO ₃),FeO(OH)
62,7669	21,07	Fe ₃ O ₄ ; FeO(OH)

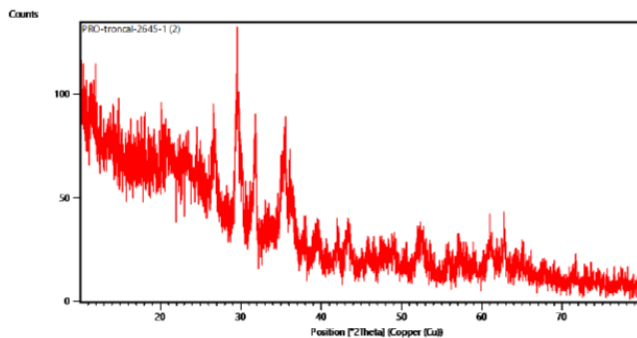


Tabla 2. Fases detectadas por DRX y FRX en anomalía #1.

Pos. [°2Th.]	Rel. Int. [%]	Fase
11,6803	15,25	FeO(OH)
26,6799	26,51	FeO(OH)
29,3955	100	(Mg _{0.03} Ca _{0.97}) (CO ₃) ; FeS
31,9126	49,61	Ca ₄ Fe ₉ O ₁₇
33,099	24,39	FeS
35,1218	37,35	FeO(OH); Fe ₃ O ₄
38,0975	9,89	FeO(OH)
39,4919	17,88	(Mg _{0.03} Ca _{0.97}) (CO ₃) ; FeO(OH); Ca ₄ Fe ₉ O ₁₇
43,2119	25,15	(Mg _{0.03} Ca _{0.97}) (CO ₃) ; FeS
47,6694	12,89	(Mg _{0.03} Ca _{0.97}) (CO ₃) ; FeS
48,6633	12,43	(Mg _{0.03} Ca _{0.97}) (CO ₃) ; FeO(OH)
52,6256	15,87	FeO(OH); FeS; Ca ₄ Fe ₉ O ₁₇
53,9659	7,75	Fe ₃ O ₄
55,7689	12,36	FeO(OH); FeS
61,0678	9,52	(Mg _{0.03} Ca _{0.97}) (CO ₃) ; FeO(OH)
64,4677	5,27	(Mg _{0.03} Ca _{0.97}) (CO ₃) ; FeO(OH)

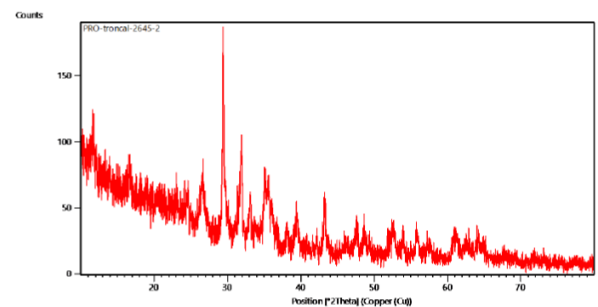


Tabla 3. Fases detectadas por DRX y FRX en anomalía #2.

Adicionalmente, se extrajeron sólidos del PK8 donde se encontraron sólidos de otra naturaleza 100% inorgánicos (insolubles en solvente) y como única fase cristalina se detectó Barita (BaSO_4), mientras que el análisis de FRX determinó elementos como Bario (Ba), Azufre (S) y Estroncio (Sr) principalmente. Los detalles se encuentran en la Tabla 4.

Fecha de muestreo	9/9/2025
FRX	
Al_2O_3	0.33%
Ba	55.60%
CaO	0.34%
Cl	0.02%
Cs	0.05%
Cu	0.01%
Fe_2O_3	0.55%
K ₂ O	0.04%
La	0.21%
MgO	0.43%
MnO	0.02%
P_2O_5	0.79%
S	24.27%
Sr	16.98%
V	0.35%
DRX	
Barita (BaSO_4)	100%
Solubilidad	
Insoluble solvente	100%

Tabla 4. Fases detectadas por DRX y FRX en PK8.

La diferencia en los resultados de los ensayos indica que se analizaron distintas capas que podrían incluso corresponder a distintas posiciones horarias sumado a la tendencia incrustante de cada PAD que acomete al ducto y las solubilidades de las especies precipitadas bajo las condiciones de operación.

El análisis químico obtenido por EDS puntual detectó cloruros y azufre en concentraciones relevantes en ambas anomalías. La coexistencia de Fe, O, Cl y S confirma un ambiente de corrosión compleja, donde CO_2 , H_2S y O_2 actúan sinérgicamente. Las zonas sin presencia de S dentro del defecto profundo indican lavado continuo de la superficie por flujo, lo cual coincide con la morfología plana observada.

3.2.1. Resultados y Conclusiones

En base al análisis de los resultados del ILI, se identifica que el 49% de las anomalías se encuentran en los primeros 500 m del ducto, y un 19% entre las progresivas 500 y 1500 m. Como se detalló anteriormente Figura 6.

Comparando esta distribución con la altimetría, es notable mencionar que los primeros 2500 metros corresponden a la zona de mayor altitud que presenta diversos valles, y es en esta zona donde se concentra el 93% de las anomalías.

Dentro de este tramo, existe una sección de pendiente negativa entre la progresiva 1600 a 1850 m, que coincide con una zona de menor densidad de anomalías, replicando la tendencia de las zonas aguas debajo de este tramo, que tienen pendientes en descenso pronunciadas (Figuras 7 y 8), las cuales tienen una menor tendencia al oleaje y, por ende, a la ruptura de la capa pasivante.

Si bien la cantidad de muestreos es pequeña y en este tipo de yacimientos es común que las condiciones de agresividad y corte de agua varíen notablemente a lo largo del tiempo, en base a la información analizada, todas las corrientes de aporte presentan en general los mismos agentes corrosivos (CO_2 , H_2S) y un elevado contenido de cloruros. De la información disponible se identifica un carácter ácido del agua aportada por cada PAD y bajas concentraciones de CO_2 y H_2S disueltos.

Bajo estos análisis, la potencialidad corrosiva del CO_2 y del H_2S individualmente se presumiría baja. Sin embargo, debe considerarse un posible efecto sinérgico entre los agentes corrosivos, sumado a condiciones que pueden acelerar la corrosión como la presencia de cloruros y elevada conductividad del agua. Adicionalmente es necesario remarcar el desconocimiento de posibles períodos de mayor concentración.

Además, las condiciones de flujo en la zona de las tres anomalías presentan ciertas variaciones:

- La anomalía #1 es alimentada por los solo dos PADs. A la altura de la anomalía #2 se suman otros 4 PADs y a la altura de la falla detectada en PK 9, se incorporan metros antes otros 4 PADs.
- Las anomalías #1 y #2 se encuentran a poca distancia del inicio de la traza (a 378 y 1088 m respectivamente) y se esperan mayores valores de temperatura que para la zona de la falla en la PK 9.
- En las anomalías #1 y #2 no se halló la capa de depósitos blanquecina observada en la falla de PK9, la cual estaba formada por barita de estroncio y vaterita. Esto es consistente con los análisis fisicoquímicos (Tabla 1) que evidencian que los pozos que ingresan a la altura de la falla son los que más aportan Calcio y Bario.

Luego de la inspección visual se evidenciaron los efectos del flujo, lo cual mostró marcas de nivel de líquido a alturas muy deferentes. Analizando estos datos en simultáneo se observa que:

- En la Anomalía #1, las marcas indicarían un nivel de líquido a horas 10:00 y 2:00, lo que corresponde a aproximadamente un 70% de nivel de líquido (Figura 13), en concordancia con el modelado ICDA 2020, el cual predijo un hold up de agua de entre 70 a 90% en la zona.
- En la Anomalía #2, las marcas de nivel son varias, indicando variaciones operativas, pero se encuentran localizadas entre las horas 5:00 y 7:00, lo que respondería a niveles de agua inferiores a 10% (Figura 13). El modelado (ICDA 2020) predice una zona con un hold up de agua menor al 1% a menos de 40 metros del sitio analizado.
- En la falla en PK 9, las marcas de nivel están concentradas a hora 6:00 y aparecen marcas secundarias en horas 4:30 y 7:30 indicando también un nivel variable. Alineado con esta observación, el modelado (ICDA 2020) predecía un hold up de agua de entre 0 a 10% dependiendo del escenario de producción).

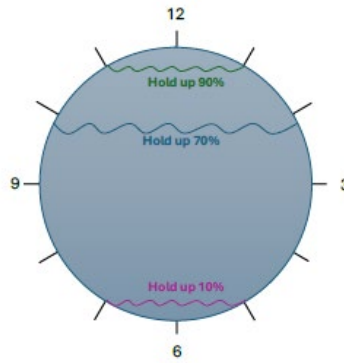


Figura 13. Ubicación de la interfase de acuerdo con el hold up de agua.

También existen diferencias significativas entre el tipo de flujo esperable en cada localización. Si bien la zona de las anomalías #1 y #2 se encuentran a una altimetría similar, la anomalía #1 se ubica en una zona de pendiente positiva, pero a pocos metros de una depresión marcada del terreno. Por su parte, la anomalía #2 también se encuentra en pendiente positiva, pero la zona se caracteriza por leves pendientes sin depresiones. En contraste, la falla del PK 9 se localiza en un tramo donde el ducto atraviesa una pendiente negativa aguas abajo de a una depresión pronunciada del terreno, con una diferencia altimétrica cercana a los 140 metros respecto del sector donde se encuentran las dos anomalías. Estas diferencias geográficas pueden representar una marcada diferencia en los patrones de flujo y turbulencias dentro del ducto, esperándose:

- Para la Anomalía #1, un flujo estratificado con olas (de acuerdo se indicó en el modelado MP-ICDA), que provocará una mayor turbulencia en la zona de la interfase y mayor tendencia a romper la capa pasivante.
- Para la Anomalía #2, un flujo canalizado especialmente en hora 6, considerando la predicción en la cercanía de bajo hold up y la pendiente positiva suave del terreno en la zona.
- Para la zona de PK9, un bajo hold up con la fase acuosa canalizada especialmente en hora 6:00, y, en este caso particular, un efecto local de alteración de las condiciones de flujo por el high-low de soldadura (efecto que no fue considerado en el modelado al desconocerse la condición).

Por todo lo mencionado anteriormente, la corrosión localizada ubicada en las anomalías #1 y #2, a pesar de la diferencia en la posición horaria, corresponde en ambos casos a la zona de la interfase agua/hidrocarburo. Esta localización se debe a:

- La formación de una celda de aireación diferencial que genera corrosión por O_2 asistida por cloruros (evidenciada por la presencia de Akaganeita detectada en ambas anomalías)
- La renovación de las especies que difunden, la cual se da a una mayor velocidad en la interfase
- Adicionalmente, para el caso de la anomalía #1 (que presenta en lugar de una canaleta continua, una zona de pits alineados, irregulares, de gran tamaño) a que el esfuerzo de corte es mayor en la zona de la interfase para el caso de flujo estratificado con olas y, por ende, también la tendencia a romper la capa pasivante.

La morfología del daño, por otra parte, característica por su fondo plano, es típica de CO_2 . Si bien no se halló Siderita en los productos de corrosión en las anomalías #1 y #2, es común que, ante ciertas condiciones de flujo, este producto de corrosión sea removido continuamente y no se llegue a depositar en este sitio, explicando también la mayor velocidad de corrosión localizada.

La presencia de FeS en los productos de corrosión, la presencia de H_2S en los análisis fisicoquímicos y el pH entre 4,5 y 7 también podrían influir asistiendo por *Sour Water Corrosion* en la zona, el cual comúnmente puede actuar de forma sinérgica con O_2 y CO_2 ¹.

Por otra parte, el daño detectado en hora 12 en la anomalía #1 es compatible con *Top of the line corrosion*, también producida por la concentración de CO_2 en las gotas que condensan en parte superior de la cañería, como se observa en la Figura 14. Mientras que la morfología del daño en la zona aledaña a la falla ubicada en el PK 9 a hora 6:00 en forma de surcos, es también característica de CO_2 (Figura 15, comparación con caso de bibliografía).

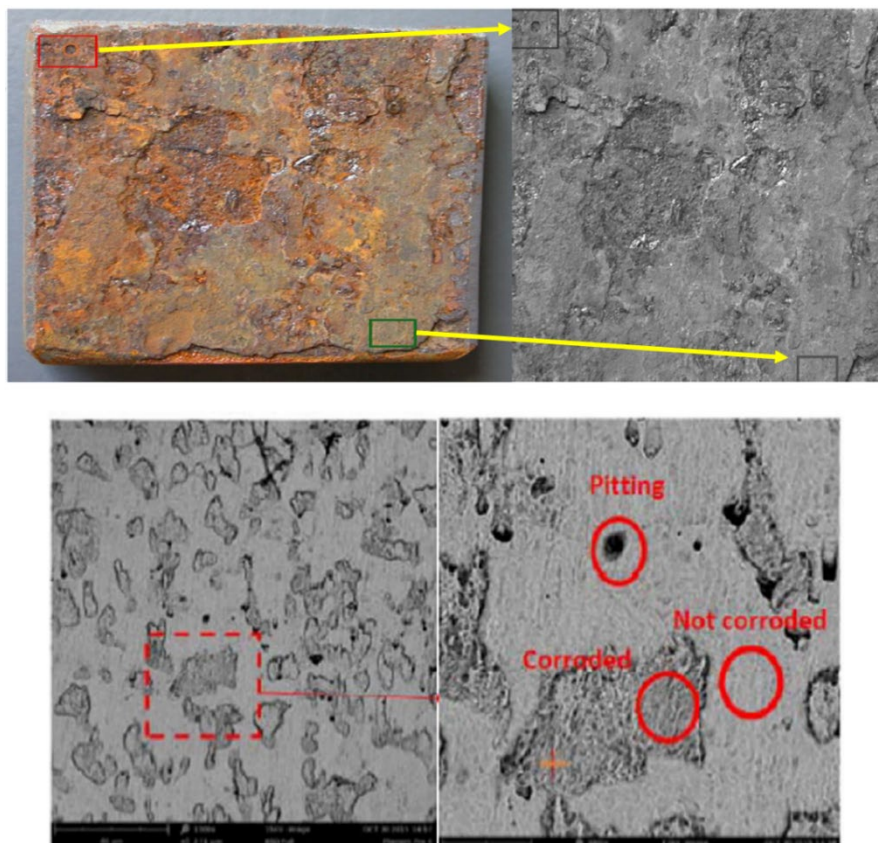


Figura 14. Arriba: Reproducción del daño a hora 12:00 de la Anomalía #1 (izquierda y derecha). Abajo: Caso de *Top of the line corrosion* por CO_2 según bibliografía¹¹.

En cuanto a la falla ocurrida en el PK 9, el modelo ICDA 2020 predijo velocidades de corrosión por CO_2 en el rango entre 10 y 25 mpy. Sin embargo, luego de realizar excavaciones correspondientes en el año 2021, no se encontraron pérdidas de espesores significativas descartando dichas velocidades. Calculando la tasa de corrosión en la zona de falla de la PK9, a lo largo de todo el período de operación (6,5 años), la velocidad resulta en 47 mpy. Lo que pone en evidencia y como condición necesaria un efecto sinérgico con otro mecanismo actuando localmente, como MIC, para que ocurriera dicha falla.

Por otro lado, presencia de elevados contenidos de cloruros actúa como un acelerador de los mecanismos de daño asistido por el flujo, al desestabilizar las incrustaciones minerales y de productos de corrosión.

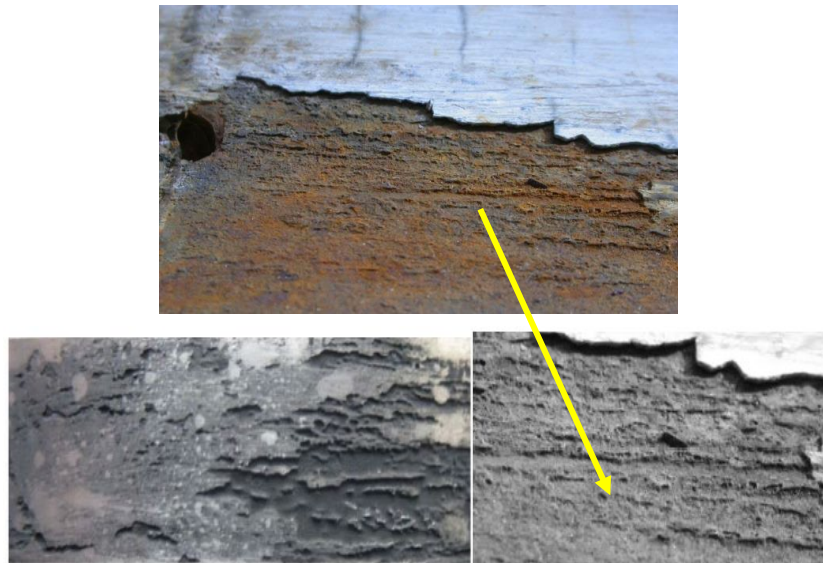


Figura 15. Comparación entre caso de bibliografía de corrosión por CO_2 en ductos de acero al carbono^{III} (izquierda) y corrosión bajo depósitos en la proximidad de la falla ocurrida en el PK 9 (Arriba y derecha abajo, extracto de Figura 12).

Concluyendo, el análisis ampliado confirma que las anomalías #1, #2 y PK9 presentan una interacción multifactorial de mecanismos corrosivos. En este contexto, la topografía interna de la línea y los patrones de flujo asociados condicionan la localización del ataque, favoreciendo que la corrosión se manifieste predominantemente en posiciones horarias específicas. Asimismo, la presencia de depósitos minerales y productos de corrosión desempeña un rol determinante en la evolución del proceso, influyendo directamente en la morfología final del daño observado. Finalmente, las diferencias identificadas entre las anomalías #1 y #2 respecto del caso PK9 pueden explicarse principalmente por variaciones en la composición del fluido, los patrones de flujo y el nivel de sólidos presentes en el sistema.

3.4. Tratamientos Químicos

3.4.1. Incrustaciones

3.4.1.1. Antecedentes

La estrategia de tratamiento consistió en una aplicación durante la fractura con una tecnología líquida a base de fosfonatos a una dosis de 25 ppm. Luego durante la puesta en marcha (PEM) de los pozos se utiliza el mismo producto químico mediante un tratamiento continuo durante los primeros 3 meses de producción. Al momento del evento, los troncales que acometen a las plantas no contaban con tratamiento químico para inhibir la formación de incrustaciones. Como parte final del proceso, existen refuerzos de tratamiento en planta CPF en el ingreso al Free Water Knockout (FWKO) y en la salida de las instalaciones para proteger los pozos sumideros.

3.4.1.2. Evaluación de Tendencias Incrustantes

Como parte del objetivo de actualizar las tendencias incrustantes para todo el yacimiento, se decide arrancar por los troncales con mayor antigüedad incluyendo al troncal que presentó la pinchadura. Los troncales en cuestión son el J, K y P; y la característica en común es que los 3 derivan su producción a la misma planta de tratamiento EPF. Debido a las estrategias de producción y en función a las capacidades de cada instalación, algunos PADs que conforman estos troncales tienen la posibilidad de derivar su producción hacia la planta de tratamiento CPF. Es por ello que se analizaron exhaustivamente las condiciones operativas para las simulaciones de tendencias incrustantes considerando todos los cambios posibles de presión y temperatura a lo largo del sistema.

La información disponible para realizar las simulaciones en el software ScaleSoftPitzer consiste en los análisis fisicoquímicos de pozos productores a las condiciones de puesta de marcha (PEM) y el último análisis realizado según al cronograma de separador de móvil que recorre el yacimiento. Por una limitación de las instalaciones de superficie, los pozos productores no cuentan con tomamuestras para líquidos de manera que es necesario realizar campañas de monitoreo para extraer muestras líquidas para análisis. Lo mismo sucede con los troncales, para poder realizar una simulación de tendencias incrustantes se debe confeccionar un fisicoquímico en base a los datos de pozos y los porcentajes de mezcla de cada PAD en el troncal.

Troncal J

A este troncal acometen 4 PADs, lo que resulta en un total de 12 pozos. La tendencia incrustante se realiza a condición de PEM de pozos y con el último análisis fisicoquímico disponible de cada pozo. Se presentan los resultados a caudales máximos (PEM) y mínimos de pozos (último ensayo). Los resultados continúan con la línea de tendencia obtenida a modo general en los distintos PADs analizados individualmente, con tendencia a la formación de Barita (BaSO_4) tanto para la PEM (Figura 18) como para la condición actual analizados en los rangos de presión y temperatura de este troncal (Figura 19). Por otro lado, el factor relacionado a variación de caudal presenta resultados similares para ambos casos. Se detallan las referencias para la interpretación de resultados en las Figuras 16 y 17.

Scale Species	SR	SI	Probability of Scale
Calcium Carbonate	1 - 4	0 - 0.60	Scale Unlikely
	>4	>0.60	Scale Possible
	>6	>0.78	Scale Likely
	>10	>1	Scale Very Likely
Scale Species	SR	SI	Probability of Scale
Calcium Sulphate	1 - 1.1	0 - 0.04	Scale Unlikely
	>1.2	>0.08	Scale Possible
			Scale Likely
			Scale Very Likely
Scale Species	SR	SI	Probability of Scale
Strontium Sulphate	>1	>0	Scale Unlikely unless minor co-deposit
	2 - 4	0.3 - 0.6	Scale Possible
	>5	>0.70	Scale Likely
	>7	>0.85	Scale Very Likely
Scale Species	SR	SI	Probability of Scale
Barium Sulphate			Scale Unlikely
	1 - 2	0 - 0.3	Scale Possible
	2 - 6	0.3 - 0.78	Scale Likely
	>6	>0.78	Scale Very Likely
Scale Species	SR	SI	Probability of Scale
Iron Carbonate	1 - 4	0 - 0.60	Scale Unlikely
	>4	>0.60	Scale Possible
	>6	>0.78	Scale Likely
	>10	>1	Scale Very Likely

Figura 16. Referencia Índice de Saturación (SI).

Scale Species	mg/l	Scale Severity
Calcium Carbonate	<300	Minor
	300-700	Moderate
	>700	Severe
		Very Severe
Scale Species	mg/l	Scale Severity
Calcium Sulphate	<300	Minor
	300-700	Moderate
	>700	Severe
		Very Severe
Scale Species	mg/l	Scale Severity
Strontium Sulphate	<100	Minor
	100-500	Moderate
	>500	Severe
	>800	Very Severe
Scale Species	mg/l	Scale Severity
Barium Sulphate	<30	Minor
	30-150	Moderate
	>150	Severe
	>300	Very Severe
Scale Species	mg/l	Scale Severity
Iron Carbonate	<300	Minor
	300-700	Moderate
	>700	Severe
		Very Severe

Figura 17. Referencia precipitación esperada.

TRONCAL J PEM Qmax		TRONCAL J PEM Qmin	
Initial(T,P)	Final(T,P)	Initial(T,P)	Final(T,P)
Saturation Index values			
Calcite		Calcite	
-0,31	-0,49	-0,85	-1,04
Barite		Barite	
1,13	1,68	1,27	1,82
Halite		Halite	
-1,96	-1,93	-1,91	-1,89
Gypsum		Gypsum	
-1,14	-1,02	-0,99	-0,88
Hemihydrate		Hemihydrate	
-1,56	-1,70	-1,42	-1,55
Anhydrite		Anhydrite	
-0,91	-1,19	-0,76	-1,05
Celestite		Celestite	
Iron Sulfide		Iron Sulfide	
Zinc Sulfide		Zinc Sulfide	
Calcium fluoride		Calcium fluoride	
Iron Carbonate		Iron Carbonate	
-0,67	-0,97	-1,25	-1,55
SiO2am		SiO2am	
SiO2cr		SiO2cr	
Mg Silicate		Mg Silicate	
Ca/Mg Silicate		Ca/Mg Silicate	
Fe Silicate		Fe Silicate	
pH		pH	
5,12	5,18	4,83	4,88
178-197		246-272	

Figura 18. Resultados de la simulación de tendencias incrustantes para la condición de PEM del troncal J. Abajo: cantidad de precipitación esperada para BaSO₄ (mg/L).

Troncales K y P

Al troncal K acometen 4 PADs, lo que resulta en un total de 12 pozos. A raíz de los resultados obtenidos en el Troncal J, se decide avanzar con el análisis de los troncales K y P con un valor fijo de caudal, por lo que se evalúan todos los casos a caudales máximos y el resto de los parámetros mantienen las mismas variaciones.

Los resultados de las simulaciones realizadas a los troncales K y P mediante la mezcla de los diferentes PADs presentaron tendencias análogas a las vistas individualmente, con tendencia a la formación de Barita (BaSO₄) tanto para la PEM como para la condición actual analizados en los rangos de presión y temperatura de cada troncal (Figuras 20 y 21). Es importante mencionar que, con el transcurso del tiempo, la tendencia a la formación de Barita en el troncal K fue exacerbada.

TRONCAL J ACTUAL Qmax		TRONCAL J ACTUAL Qmin	
Initial(T,P)	Final(T,P)	Initial(T,P)	Final(T,P)
Saturation Index values			
Calcite		Calcite	
-1,12	-1,28	-1,32	-1,50
Barite		Barite	
1,02	1,56	1,12	1,66
Halite		Halite	
-1,74	-1,71	-1,75	-1,73
Gypsum		Gypsum	
-1,16	-1,04	-1,07	-0,95
Hemihydrate		Hemihydrate	
-1,58	-1,71	-1,49	-1,62
Anhydrite		Anhydrite	
-0,92	-1,20	-0,83	-1,11
Celestite		Celestite	
Iron Sulfide		Iron Sulfide	
Zinc Sulfide		Zinc Sulfide	
Calcium fluoride		Calcium fluoride	
Iron Carbonate		Iron Carbonate	
-1,59	-1,88	-1,80	-2,10
SiO2am		SiO2am	
SiO2cr		SiO2cr	
Mg Silicate		Mg Silicate	
Ca/Mg Silicate		Ca/Mg Silicate	
Fe Silicate		Fe Silicate	
pH		pH	
4,29	4,35	4,18	4,23
156-179mg/l		196-222mg/l	

Figura 19. Resultados de la simulación de tendencias incrustantes para la condición de operación actual del troncal J. Abajo: cantidad de precipitación esperada para BaSO₄ (mg/L).

TRONCAL K PEM		TRONCAL K ACTUAL	
Initial(T,P)	Final(T,P)	Initial(T,P)	Final(T,P)
Saturation Index values			
Calcite		Calcite	
-0,67	-0,87	-0,89	-0,98
Barite		Barite	
1,14	1,70	1,49	2,08
Halite		Halite	
-2,13	-2,10	-1,77	-1,74
Gypsum		Gypsum	
-1,26	-1,14	-0,88	-0,73
Hemihydrate		Hemihydrate	
-1,69	-1,82	-1,30	-1,40
Anhydrite		Anhydrite	
-1,04	-1,31	-0,64	-0,89
Celestite		Celestite	
Iron Sulfide		Iron Sulfide	
Zinc Sulfide		Zinc Sulfide	
Calcium fluoride		Calcium fluoride	
Iron Carbonate		Iron Carbonate	
-1,21	-1,53	-1,38	-1,59
SiO2am		SiO2am	
SiO2cr		SiO2cr	
Mg Silicate		Mg Silicate	
Ca/Mg Silicate		Ca/Mg Silicate	
Fe Silicate		Fe Silicate	
pH		pH	
4,76	4,80	4,53	4,63
137-147mg/l		340-356mg/l	

Figura 20. Resultados de la simulación de tendencias incrustantes para las condiciones de PEM y actuales del troncal K. Abajo: cantidad de precipitación esperada para BaSO₄ (mg/L).

TRONCAL P PEM		TRONCAL P	
Initial(T,P)	Final(T,P)	Initial(T,P)	Final(T,P)
Saturation Index values			
Calcite		Calcite	
-0,70	-0,87	-1,19	-1,28
Barite		Barite	
0,99	1,54	0,91	1,48
Halite		Halite	
-1,72	-1,70	-1,59	-1,56
Gypsum		Gypsum	
-1,18	-1,07	-1,08	-0,93
Hemihydrate		Hemihydrate	
-1,60	-1,74	-1,49	-1,60
Anhydrite		Anhydrite	
-0,94	-1,23	-0,83	-1,08
Celestite		Celestite	
-2,09	-2,08		
Iron Sulfide		Iron Sulfide	
Zinc Sulfide		Zinc Sulfide	
Calcium fluoride		Calcium fluoride	
Iron Carbonate		Iron Carbonate	
-1,18	-1,46	-1,93	-2,14
SiO2am		SiO2am	
SiO2cr		SiO2cr	
Mg Silicate		Mg Silicate	
Ca/Mg Silicate		Ca/Mg Silicate	
Fe Silicate		Fe Silicate	
pH		pH	
4,44	4,50	4,13	4,22
147-168 mg/L		160-196 mg/L	

Figura 21. Resultados de la simulación de tendencias incrustantes para las condiciones de PEM y actuales del troncal P. Abajo: cantidad de precipitación esperada para BaSO₄ (mg/L).

Del análisis global de tendencias incrustantes es posible concluir que la tendencia a la formación de Barita se encuentra desde el agua de producción de los pozos y continúa a lo largo de todo el proceso manteniendo valores similares a pesar de los cambios de presión, temperatura y tiempo. Por otro lado, los troncales analizados no presentan tendencia a la formación de otro tipo de sales. Es importante aclarar que la simulación de la Calcita es muy sensible a la temperatura y al pH. Los valores analizados reportan un valor de pH considerado bajo para las aguas de producción (4,5 a 5,5) y por ello las tendencias en general son negativas o bajas. En caso de registrarse un ligero cambio de pH en un equipo, es posible que esa tendencia se vuelva favorable sin necesidad de analizar otra composición del sistema. Para continuar con la evaluación integral de tendencia incrustante, se avanza con la evaluación a nivel laboratorio de diversas tecnologías para el tratamiento de las mismas. El objetivo de este ensayo de laboratorio es buscar nuevas alternativas tecnológicas que presenten una performance favorable para el yacimiento, además de contemplar beneficios colaterales que pudiesen estar implicados.

3.4.1.3. Ensayo de Selección de Químico

Se realizaron pruebas comparativas entre el producto actual a base fosfonatos, otra tecnología de pH neutro y una alternativa a base de polímeros, evaluando su desempeño de inhibición mediante pruebas de eficiencia estática, utilizando la técnica de espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

La prueba de Eficiencia Estática es una evaluación preliminar del inhibidor de incrustaciones donde, en forma rápida, y visual, se seleccionan los mejores productos y el rango de dosificaciones a probar posteriormente.

En estas pruebas, además de las dosificaciones indicadas para el producto, también se realiza una mezcla de salmueras sin el inhibidor (blanco) y otra mezcla entre agua desionizada y la solución catiónica (referencia). Teóricamente, en el blanco tendremos la mayor cantidad de precipitado y en el de referencia, donde no tenemos aniones incrustantes, no hay precipitación.

En este tipo de evaluación, las 2 primeras horas son decisivas tanto para la precipitación del blanco, que determinará la criticidad del agua, como para evaluar el producto en la inhibición de esa posible precipitación.

Se deben retirar alícuotas de la solución 24 hs después del inicio de la prueba y, al alcanzar la temperatura ambiente, someterlas a análisis del catión precipitante. La eficiencia del inhibidor de incrustaciones debe calcularse en función de la concentración del catión precipitante en la mezcla, según la ecuación:

$$Eficiencia (\%) = \frac{(C_a - C_b)}{(C_0 - C_b)} \times 100$$

Donde:

- C_a = concentración (mg/L) del catión precipitante en solución después de la prueba del inhibidor
- C_b = concentración (mg/L) del catión precipitante en solución en el ensayo del blanco (sin inhibidor)
- C_0 = concentración (mg/L) del catión precipitante en la mezcla

Resultados

Para esta evaluación se utiliza el siguiente orden de las botellas: Referencia, Blanco, 15, 25, 50, 75, 100, 125, 150 y 200 ppm.

Troncal J

*Excepcionalmente para el Troncal J, en las fotos tomadas “después de mezclar”, la muestra “Blanco” esta después de la muestra “Referencia”.

Después de mezclar*	
Aspecto	Precipitaciones únicamente en Blanco.
Después de 24 horas a 40°C	
Aspecto	Precipitaciones únicamente en Blanco.

Figura 22. Registro fotográfico de la prueba de botella con el inhibidor de incrustaciones de pH neutro a 40°C.

Después de mezclar*	
Aspecto	Precipitaciones únicamente en Blanco.
Después de 24 horas a 40°C	
Aspecto	Precipitaciones únicamente en Blanco.

Figura 23. Registro fotográfico de la prueba de botella con el inhibidor de incrustaciones actual a 40°C.

Después de mezclar*	
Aspecto	Precipitaciones únicamente en Blanco.
Después de 24 horas a 40°C	
Aspecto	Precipitaciones únicamente en Blanco.

Figura 24. Registro fotográfico de la prueba de botella con el inhibidor de incrustaciones a base de polímeros a 40°C.

Visualmente, inmediatamente después de mezclar las aguas y transcurridas 24 hs, solo la solución del Blanco mostró precipitación. No se observó precipitación aparente en los productos dosificados (Figuras 22, 23 y 24). Los resultados comparativos de performance de todas las químicas se observan en la Figura 25.

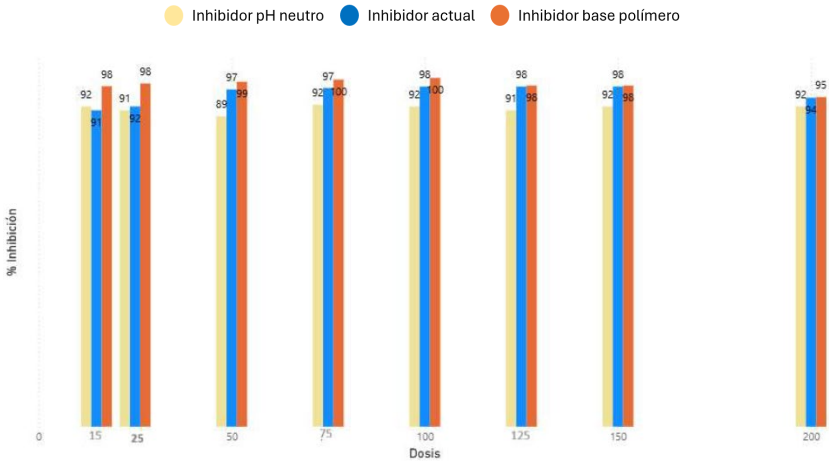


Figura 25. Evaluación de la inhibición de sulfato de bario en el Troncal J.

Después de mezclar	
Aspecto	Precipitaciones en Blanco, 15 y 25 ppm.
Después de 24 horas a 40°C	
Aspecto	Precipitaciones únicamente en Blanco.

Figura 26. Registro fotográfico de la prueba de botella con el inhibidor de incrustaciones de pH neutro a 40°C.

Después de mezclar	
Aspecto	Precipitaciones únicamente en Blanco.
Después de 24 horas a 40°C	
Aspecto	Precipitaciones únicamente en Blanco.

Figura 27. Registro fotográfico de la prueba de botella con el inhibidor de incrustaciones actual a 40°C.

Después de mezclar	
Aspecto	Precipitaciones únicamente en Blanco.
Después de 24 horas a 40°C	
Aspecto	Precipitaciones únicamente en Blanco.

Figura 28. Registro fotográfico de la prueba de botella con el inhibidor de incrustaciones a base de polímeros a 40°C.

De los 3 productos evaluados, el inhibidor a base de polímeros mostró un rendimiento visual solo a partir de 50 ppm, mientras que los demás lo mostraron en todas las dosis evaluadas (Figuras 26, 27 y 28). Los resultados comparativos de performance de todas las químicas se observan en la Figura 25.

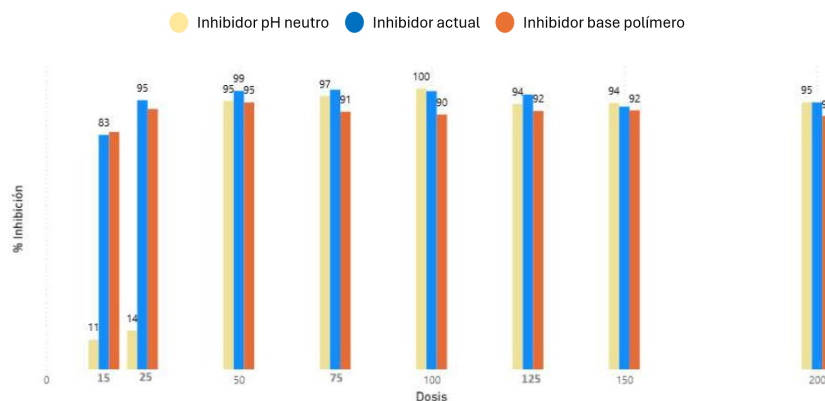


Figura 29. Evaluación de la inhibición de sulfato de bario en el Troncal K.

3.4.1.4. Conclusiones y Recomendaciones

De acuerdo a las pruebas realizadas es posible hacer las siguientes consideraciones:

- En el escenario Troncal J, el menos crítico, los 3 productos evaluados mostraron un buen desempeño en la inhibición del sulfato de bario luego de 24 hs de prueba. Los productos a base de fosfonatos y polímero destacaron.
- En el escenario Troncal K, el más crítico, luego de 24 hs de prueba, el producto con pH neutro solo mostró eficacia a partir de 50 ppm, lo que lo distingue del rendimiento de los otros productos evaluados, los cuales demostraron eficacia en todo el rango de dosificación evaluado, incluyendo las concentraciones más bajas (15 y 25 ppm). Nuevamente, los productos a base de fosfonatos y polímero destacan por su rendimiento.
- El producto actual utilizado en el yacimiento presenta una performance superadora con valores de eficiencia superiores a 90% en inhibición de incrustación desde dosis iniciales y, en particular, a la dosis de 25 ppm presenta eficiencia de inhibición entre 92 y 95%.
- Se propone iniciar con una dosificación continua del producto actual a una dosis de 25 ppm en el extremo de los troncales para tratar la mayor producción posible.

3.4.2. Corrosión

3.4.2.1. Antecedentes

Desde el punto de vista de la corrosión, previo al evento se contaba con dos puntos de dosificación continua y un tercer punto de inyección por batcheo en la planta CPF. La estrategia está pensada para proteger todas las instalaciones desde el ingreso de la producción de campo a planta hasta la salida con destino a pozos sumideros. Referido al tratamiento de pozos, al momento del evento no se contaba con puntos de dosificación para inhibición de corrosión.

3.4.2.2. Evaluación de Tendencias Corrosivas

Como primera medida, tras el evento se realizó un monitoreo del potencial corrosivo en todos los pozos del yacimiento. Para la simulación con el software DownHole SAT™, se utilizaron las cromatografías gaseosas de puesta en marcha de cada pozo y se establecieron condiciones de proceso conservadoras, un rango de temperatura de 40 a 80 °C y presiones 60 a 104 kg/cm². En la Tabla 5, se muestran aquellos pozos que evidenciaron un mayor potencial corrosivo y los datos utilizados para la simulación. Es importante destacar que ninguno de los pozos seleccionados descargaba en el troncal P.

Pozo	1	2	3	4
Troncal	J	K	K	J
SH ₂ [ppm] fase gaseosa	0,80	1,50	0,86	0,70
CO ₂ [% molar] fase gaseosa	0,2688	0,2380	0,2583	0,2845
CO ₂ [ppm] fase acuosa	170	35	250	180

Tabla 5. Datos utilizados para la simulación con DownHole SAT™.

En la Figura 30 se listan los resultados obtenidos de la simulación para cada pozo. Al evaluar la tasa de corrosión a las temperaturas y presiones de operación, todas las simulaciones mostraron tasas de corrosión bajas en relación con el valor de 4 MPY, que según la norma ASTM G31, es un valor aceptable.

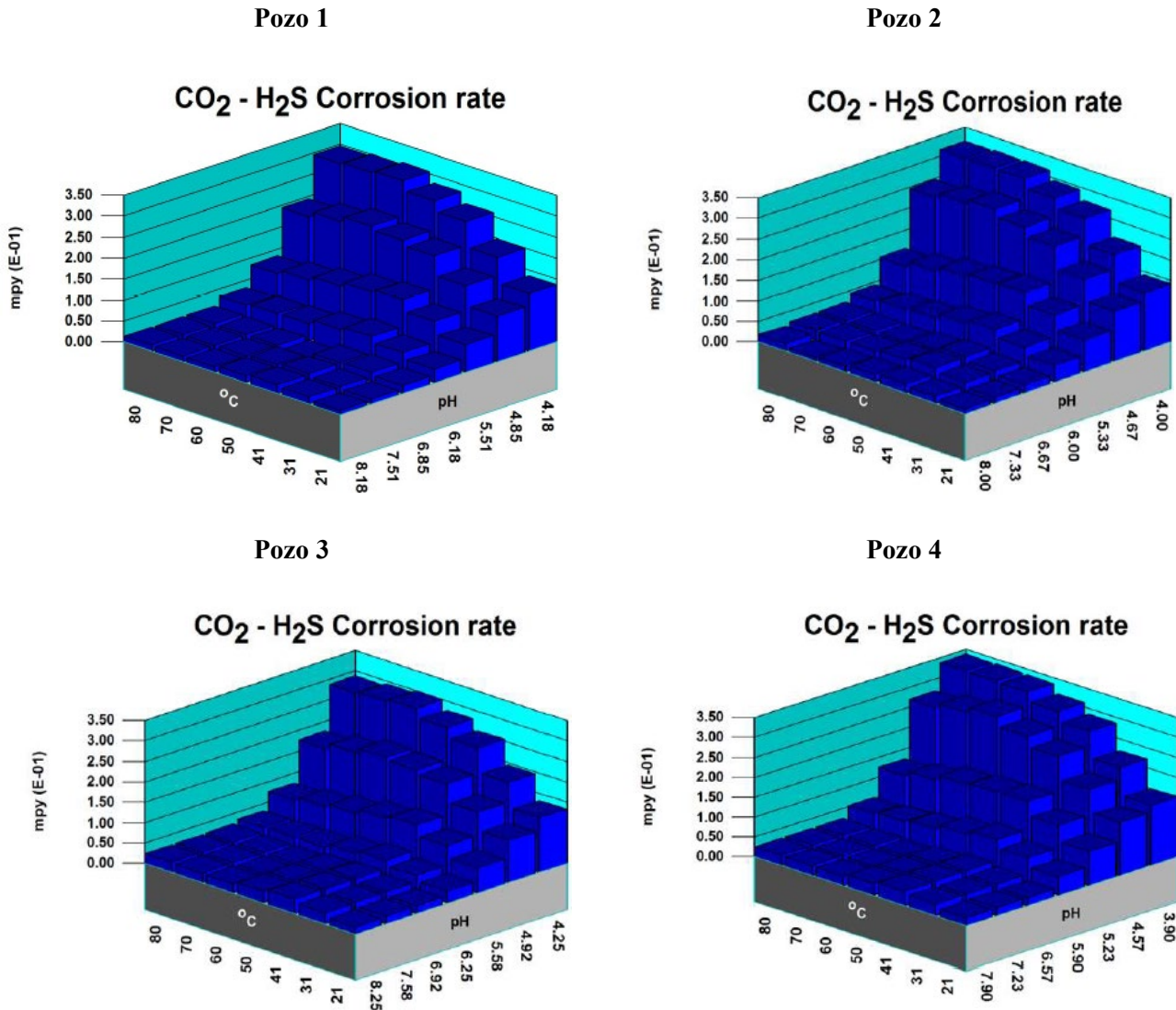


Figura 30. Resultados de simulación de tendencias corrosivas en pozos críticos.

En síntesis, no se detectó corrosividad significativa en los pozos evaluados, motivo por el cual, se procedió a realizar evaluaciones adicionales para determinar la dosificación química necesaria para mantener el sistema libre de corrosión.

3.4.2.3. Ensayo de Selección de Químico

Con el objetivo de seleccionar una tecnología que permita inhibir y proteger el gathering de la corrosión, se realizó una prueba de burbuja. La prueba de burbuja es un ensayo electroquímico diseñado para evaluar el comportamiento corrosivo de una solución bajo condiciones controladas. En este tipo de análisis, la solución se satura con CO₂ para generar un ambiente corrosivo controlado y evaluar el comportamiento del metal mediante mediciones de potencial.

Por su parte, la técnica de Resistencia de Polarización Lineal (LPR) es el método de medición que permite cuantificar la velocidad de corrosión en tiempo real y se utiliza para evaluar la eficiencia de los inhibidores de corrosión a diferentes dosis. El procedimiento consiste en aplicar una pequeña polarización a la probeta con la solución (de aproximadamente ± 10 mV) y medir la corriente inducida. A continuación, se grafican los resultados y de la pendiente potencial-corriente se calcula la resistencia de polarización y, a partir de ella, la velocidad de corrosión en tiempo real. Con este último dato, se determina la eficiencia del proceso.

Como criterio de eficiencia, se consideró una eficiencia global superior al 90%, calculada sobre la base de las tasas de corrosión medidas en la prueba en blanco (sin producto químico) y con inhibidor. La siguiente ecuación nos permite calcular la eficiencia de la inhibición según los resultados de velocidad obtenidos de la LPR:

$$E(\%) = \frac{TC_s - TC_c}{TC_s} \times 100$$

Donde:

- E=Eficiencia de % de inhibición
- TC_s = Tasa de corrosión medida sin tratamiento químico (blanco)
- TC_c = Tasa de corrosión medida con inhibidor de corrosión

Entonces, para realizar esta prueba, se seleccionó el pozo 3 (presentado en la Table 5) debido a su condición más corrosiva. En la Figura 31 se presenta el equipo utilizado para realizar la prueba LPR. Cabe destacar que todo el aparato experimental se limpió con agua corriente, detergente y alcohol isopropílico. Asimismo, la preparación de la superficie de las probetas (cps) se realizó mediante chorro abrasivo con microesferas de vidrio (tipo AA, de 212 a 600 micras). Para el montaje, se colocaron tres probetas en sus varillas, una de ellas se utilizó como electrodo de trabajo y las otras dos, como electrodos de referencia y auxiliar en la sonda LPR.



Figura 31. Aparato experimental de prueba de burbujas.

El procedimiento consistió en introducir en la celda la solución salina preparada con la composición del pozo 3, saturarla mediante burbujeo de CO_2 durante una hora, para finalmente insertar la sonda de LPR y medir el potencial. El proceso se repitió tanto sin dosis (blanco de referencia) como modificando la

dosis de producto en cada ensayo. Las mediciones electroquímicas de cada uno de estos se espaciaron por treinta minutos durante veinticuatro horas.

Con respecto al producto ensayado, es importante mencionar que es un inhibidor de corrosión base acuosa que genera protección filmica. Presenta un buen desempeño en un rango amplio de pH, alta resistencia frente a ácidos fuertes, compuestos orgánicos y gases corrosivos, y además disminuye el potencial de formación de emulsiones debido a la incorporación de surfactantes.

Como resultado de la prueba, el porcentaje de eficiencia del producto a distintas dosis se muestra en la Tabla 6. Visualmente, todas las dosis presentaron soluciones claras.

Dosis de producto [ppm]	Eficiencia [%]
20	91,23
35	95,97
50	96,77
75	99,22

Tabla 6. Eficiencia de la inhibición de corrosión a distintas dosis de producto.

Como conclusión, el producto actual presenta una muy buena performance (con una eficiencia superior al 90% en todos los resultados), en la inhibición de corrosión desde la dosis inicial hasta la dosis final evaluada.

3.4.3. Bacterias

Para validar la eficiencia de la propuesta de tratamiento utilizada en planta CPF se propone realizar un ensayo Kill Test con biocidas a base de glutaraldehído, THPS y amonios cuaternarios. El esquema de dosificación consiste en lo siguiente:

- Biocida base glutaraldehído: 2 veces por semana mediante batch a una dosis de 450 ppm en tanque pulmón y tanques de inyección.
- Biocida base THPS: 1 vez al mes mediante batch a una dosis de 500 ppm en tanques de inyección.

Esta estrategia de rotación de principios activos tiene como finalidad evitar el acostumbramiento de las bacterias a un único tipo de biocida, mejorando así la efectividad del tratamiento a largo plazo y garantizando un control microbiológico sostenido.

Para el Kill Test se utilizó muestra de agua del ingreso a la planta (slug catcher) y, se evaluaron productos químicos conformados por diferentes materias activas a diferentes dosis en comparación con el blanco. Por último, el seguimiento de performance se realizó a partir de medición de ATP y medios de cultivo para bacterias Sulfato Reductoras (BSR) y Productoras de ácido (BPA).

Los resultados del ensayo demuestran que el programa de tratamiento actual es eficiente para el control microbiológico del sistema.

La disminución de dosis continúa mostrando resultados positivos tanto en las mediciones de ATP como en los cultivos de caldos BSR y BPA, lo que indica la posibilidad de optimizar las dosificaciones sin comprometer la efectividad del tratamiento. Se propone realizar una optimización de dosis por batcheo:

a 350 ppm de biocida base glutaraldehído y 400 ppm de biocida base THPS, acompañado del monitoreo operativo para evaluar la performance del tratamiento con las pertinentes modificaciones.

Tomando esta propuesta como referencia se utilizará como punto de partida para las recomendaciones de tratamiento de los troncales.

3.4.3.1. Estudio de ADN

Para complementar el monitoreo de cultivo de caldos y ATP se decide avanzar con un estudio de ADN incorporando otras técnicas de monitoreo como qPCR y NGS. Con la amplificación y cuantificación del ADN mediante fluorescencia en tiempo real (qPCR) es posible realizar un conteo de tipos de microorganismos, entre ellos destacamos aquellos que no son cultivables como las Procariotas Sulfato Reductoras (SRP) y Arqueas Totales, especies de interés por su capacidad de generar Corrosión Microbiológica (MIC). Con que la técnica de secuenciación del gen 16S es posible comparar el ADN ribosomal con la información de un banco de datos para definir las especies presentes en la muestra a un nivel de género o familia de microorganismos (especificación completa).

La última auditoría microbiológica se realizó en 2023 y por lo acontecido con el troncal P en 2025 se decide actualizar este estudio para verificar si la condición del yacimiento había sufrido cambios a largo de su desarrollo. Se extrajeron muestras de algunos pozos de interés y de la planta CPF, para enviarlas a analizar en los laboratorios especializados. Al momento de este informe no se cuenta con los resultados de este análisis.

3.4.4. Tratamiento Integral de Troncales

En base los resultados obtenidos y características del proceso, incluyendo la presencia de gases corrosivos en los pozos, no se evidencia corrosividad severa en el sistema. A su vez, del monitoreo de bacterias que afectan a la corrosión microbiológica se detecta presencia de las mismas en valores cercano al límite dentro del rango establecido. Paralelamente, en campo para los troncales J y K, no hay evidencia de problemática asociada a fenómenos de corrosión. No obstante, en Troncal P se produjo un fenómeno asociado.

Por estos motivos, se recomienda un tratamiento químico desplegado en dos líneas de acción el tratamiento post limpieza mecánica y el preventivo.

3.4.4.1. Tratamiento post limpieza mecánica

En primera instancia, posterior a la limpieza mecánica de los troncales, se recomienda un tratamiento que tiene por objetivo complementar químicamente esta limpieza en términos de control de bacterias y, posterior, formación de película filmica inhibidora.

Para ello se recomienda realizar la aplicación por batch que se detalla en la Figura 32, a un volumen de producto químico que: asegure el tiempo de contacto y eficiencia de acción de los productos según la capacidad de cada troncal.

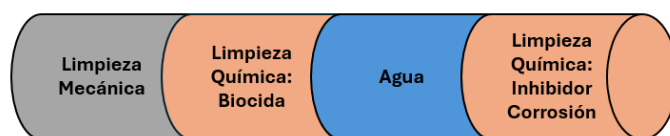


Figura 32. Metodología de limpieza de troncales.

3.4.4.2. Tratamiento preventivo

En segunda instancia, se recomienda implementar un tratamiento químico regular para los troncales, con una dosificación mínima que garantice el mantenimiento preventivo del sistema hasta la próxima limpieza programada. Este tratamiento tiene los siguientes objetivos:

- Prevenir la formación de biopelículas a lo largo del troncal, evitando la generación de zonas de corrosión localizada que puedan comprometer la integridad del ducto. La presencia de biopelículas actúa como concentrador de corrosión al crear condiciones anaeróbicas favorables para bacterias sulfato-reductoras (BSR).
- Controlar y minimizar la actividad bacteriana en el sistema, específicamente bacterias sulfato-reductoras y formadoras de ácidos, previniendo la corrosión microbiológica y evitando la contaminación microbiológica de las instalaciones y equipos aguas abajo.

A raíz de lo descripto y, en base a las condiciones del proceso se recomienda el siguiente tratamiento:

Tratamiento combinado: Inhibidor de Corrosión en continua y biocida por batch

Con el objetivo de mantener una película protectora continua en el ducto, se recomienda la aplicación de inhibidor de corrosión en modo continuo a dosis mínima, considerando que los resultados de las evaluaciones de tendencias corrosivas evidenciaron valores de corrosividad leve en el sistema (Tabla 7).

Para la aplicación del biocida, se recomienda un tratamiento por batch que asegure la eficacia del producto mediante concentraciones de choque controladas, permitiendo un tiempo de contacto adecuado para la eliminación efectiva de microorganismos y biopelículas (Tabla 8).

Ventajas de esta alternativa:

- Protección anticorrosiva permanente mediante película protectora continua.
- Mayor eficacia del biocida mediante aplicación concentrada por batch.
- Control microbiológico efectivo con optimización del consumo de producto.
- Flexibilidad operativa en la frecuencia de aplicación del biocida.

Producto Químico	Dosis (ppm)
Inhibidor de Corrosión	15

Tabla 7. Propuesta técnica para inhibidor de corrosión en continua.

Troncal	Producto Químico	Hs de batch	Batch por semana	Dosis (ppm)
J y K	Biocida	2	1	250
P	Biocida	3	1	250

Tabla 8. Propuesta técnica para biocida por batcheo.

Con el fin de evitar el acostumbramiento y desarrollo de resistencia de las poblaciones bacterianas presentes en el sistema, se recomienda establecer un programa de rotación de biocidas con diferentes mecanismos de acción. La alternancia propuesta consiste en cambiar cada 2 meses aproximadamente entre el biocida a base glutaraldehído y otro a base de THPS. Esta práctica garantiza la eficacia sostenida del tratamiento biocida al impedir que los microorganismos desarrollen mecanismos de defensa contra un único agente antimicrobiano. Similar a práctica aplicada en planta CPF.

4. Conclusiones

El evento evidenció la importancia de la mantenibilidad operativa en sistemas de transporte multifásico. La imposibilidad de realizar limpiezas internas periódicas contribuyó al deterioro acelerado del ducto. El estudio post-falla permitió obtener evidencia de que la línea se encontraba en un grado de deterioro mayor al esperado. Esto originó un plan integral de acción para conocer el estado de todos los ductos del sistema de gathering, conocer las características propias del yacimiento de manera más precisa y mejorar la gestión a futuro para reducir el riesgo asociado de los activos.

A partir de las lecciones aprendidas, se definieron acciones estratégicas para mitigar futuros eventos similares en el sistema de gathering:

- Cambio de paradigma para trabajar en conjunto con el equipo de Producción para efectuar la limpieza de troncales de manera periódica entendiendo el riesgo que conlleva la acumulación de sólidos en un sistema en combinación con la corrosividad de los fluidos de producción.
- Completar la evaluación del análisis de riesgo y estado de situación del gathering completo para definir frecuencias de remoción en función a la criticidad, y tratamiento químico para proteger las instalaciones de agentes corrosivos y prevenir la formación de incrustaciones garantizando una mayor limpieza del sistema.
- Ejecutar un programa integral de inspecciones internas que contemple a ductos piggeables como no piggeables. Para ello, se tiene en cuenta sitios de mayor preponderancia de acumulación de sólidos, velocidades de flujo y condiciones operativas.

5. Referencias

[I] API 571 Ed. 2020

[II] Aisha H. Al-Moubaraki, I.B. Obot, Top of the line corrosion: causes, mechanisms, and mitigation using corrosion inhibitors, *Arabian Journal of Chemistry*, Volume 14, Issue 5, 2021, 103116, ISSN 1878-5352, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103116>

[III] Jianbo Sun, Chong Sun, Guoan Zhang, Weimin Zhao, Yong Wang; Effect of Water Cut on the Localized Corrosion Behavior of P110 Tube Steel in Supercritical CO₂/Oil/Water Environment. *CORROSION* 1 November 2016; 72 (11): 1470–1482. <https://doi.org/10.5006/1926>