



Vigilada Mineducación

## VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS METÁLICAS ENTERRADAS PARA SOPORTE DE PANELES SOLARES

Por

Carolina Lotero Carvajal

Trabajo para optar al título de Master en ingeniería

Asesor de Maestría

Manuel Builes

Ingeniero civil, UN. Master en Ingeniería, Universidad de Tokyo, Japón.

Universidad EAFIT

Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería

Medellín

2024

## Índice General

1.	Introducción .....	5
2.	Objetivos.....	6
2.1	Objetivo General .....	6
2.2	Objetivo específico.....	6
3.	Planteamiento y formulación del problema.....	7
4.	Pregunta de investigación .....	8
5.	Marco teórico .....	9
6.	Metodología de estudio .....	13
7.	Revisión del estado del arte .....	14
8.	Método de cálculo y predicción de la corrosión de estructuras de metálicas enterradas .....	19
8.1	Métodos cualitativos.....	19
8.1.1	Potencial Redox .....	19
8.1.2	Resistividad .....	20
8.1.3	PH.....	20
8.1.4	EN 12501-2:2003 .....	21
8.1.5	AWWA C-105 .....	21
8.1.6	Método DVGW.....	22
8.2	Métodos cuantitativos .....	23
8.2.1	Modelo de cálculo Romanoff (1957)-Modelo FHWA-NHI-09-087 .....	23
9.	Casos de estudio.....	29
9.1	Caso de estudio PLANTA FOTOVOLTÁICA TULUÁ.....	29
9.2	Caso de estudio PLANTA FOTOVOLTÁICA RUBIALES .....	36
9.3	Análisis de resultados.....	42
10.	Conclusiones .....	43
11.	Referencias.....	44

## Índice de Figuras

Figura 1. Pérdida de material en función de la resistividad .....	24
Figura 2. Pérdida de metal en función de la resistividad .....	26
Figura 3. Pérdida de material en función de la resistividad-TULUÁ.....	32
Figura 4. Pérdida de material en función de la resistividad. Proyecto TULUÁ.....	34
Figura 5. Pérdida de metal en función de la resistividad. Proyecto TULUÁ.....	34
Figura 6. Pérdida de material en función de la resistividad-RUBIALES .....	38
Figura 7. Pérdida de material en función de la resistividad. Proyecto RUBIALES .....	40
Figura 8. Pérdida de metal en función de la resistividad. Proyecto RUBIALES .....	41

## Índice de Tablas

Tabla 1. Potencial Redox. [3].....	19
Tabla 2. Nivel corrosión del suelo según resistividad. [17] .....	20
Tabla 3. Nivel corrosión del suelo según PH.[18].....	20
Tabla 4. Nivel corrosión del suelo según Resistividad y PH según EN 12501-2:2003. ....	21
Tabla 5. Nivel corrosión del suelo según multivariabes EN 12501-2:2003[19].....	21
Tabla 6. Nivel corrosión del suelo según multivariabes DIN50929-3 [20] .....	22
Tabla 7. Nivel corrosión ambiental UNE-EN ISO 14713-1:2009 [22].....	27
Tabla 8. Normas y documentos de referencia para casos de estudio .....	29
Tabla 9. Ubicación geográfica proyecto planta fotovoltaica TULUÁ.....	29
Tabla 10. Documentos de referencia proyecto planta fotovoltaica TULUÁ .....	30
Tabla 11. Parámetros empleados proyecto planta fotovoltaica TULUÁ.....	30
Tabla 12. Resultados modelo galvanizado proyecto planta fotovoltaica TULUÁ .....	33
Tabla 13. Ubicación geográfica proyecto planta fotovoltaica RUBIALES .....	36
Tabla 14. Documentos de referencia proyecto planta fotovoltaica RUBIALES.....	36
Tabla 15. Parámetros empleados proyecto planta fotovoltaica RUBIALES .....	36
Tabla 16. Resultados modelo galvanizado proyecto planta fotovoltaica RUBIALES.....	39

## **1. Introducción**

En el ejercicio del diseño de estructuras metálicas para el soporte de paneles solares, ha surgido la necesidad según el mercado de la energía fotovoltaica, de brindarles garantía a las estructuras similar o igual a la garantía de los paneles solares, la cual oscila entre 20 y 30 años [1]

Uno de los factores primordiales es evaluar la corrosión en el tiempo, pues al considerar una cimentación en hincado directo, las estructuras estarán en contacto directo con el suelo sometidas a los agentes corrosivos y características geotécnicas tales como resistividad, PH, entre otras.

La finalidad de este proyecto de investigación aplicada se basa en poder identificar esas características geotécnicas y definir de manera teórica el cálculo de la velocidad de corrosión en la estructura metálica que indicará la vida útil de las estructuras.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Calcular la velocidad de corrosión del suelo a partir de propiedades geotécnicas

### **2.2 Objetivo específico**

- Definir los parámetros geotécnicos relevantes para la definición del nivel de corrosión de los suelos.
- Identificar medidas de Mitación y protección ante la corrosión de estructuras metálicas enterradas

### **3. Planteamiento y formulación del problema**

En el ámbito de la ingeniería civil y la construcción, la interacción entre el suelo y las estructuras metálicas es un factor crítico que puede afectar la durabilidad y la estabilidad de las estructuras a lo largo del tiempo. El comportamiento geotécnico de los suelos, como su capacidad de carga, compresibilidad y expansividad, desempeña un papel fundamental en la respuesta de las cimentaciones y otros elementos estructurales. Para efectos de esta investigación, se analizará la complejidad de la interacción entre las estructuras metálicas hincadas directamente, las características geotécnicas de los suelos y la corrosión causada en dichas estructuras por los agentes agresivos de los suelos. Comprender cómo y cuáles características geotécnicas aportan información con el fin de detectar la velocidad de corrosión de los suelos según su tipología y agentes externos que puedan afectar con el objetivo de proporcionar directrices y estrategias para mitigar los efectos negativos de la corrosión en la seguridad y la durabilidad de las estructuras metálicas.

#### **4. Pregunta de investigación**

¿Cómo calcular la velocidad de corrosión de las estructuras metálicas de soporte de paneles solares en contacto directo con el suelo a partir de las propiedades geotécnicas?

## 5. Marco teórico

Según [2] actualmente los estudios en la medición de la corrosión de los suelos y la afectación a las estructuras metálicas cimentadas directamente son carentes de información.

Desde el comienzo del uso de estructuras metálicas, propiamente acero, en el campo de la construcción, la corrosión ha sido uno de los principales enemigos, la cual puede definirse como pérdida o destrucción gradual de material o de sus propiedades según el medio en el que se encuentren inmersos [3]. Hablando propiamente de las estructuras metálicas enterradas, se trata del deterioro ocasionado por la acción química, mecánica y biológica de los suelos.

Las propiedades principales del terreno involucradas en la degradación corresponden al tipo de suelo o caracterización definida, presencia de agua, concentración de oxígeno, potencial redox, el pH, la resistividad y el contenido de bacterias.

Es posible relacionar cada una de las variables anteriormente mencionadas con la corrosión de forma independiente, sin embargo, en la realidad la afección corrosiva en las estructuras metálicas supone la interacción de todos ellos actuando severamente y al mismo tiempo.

En conclusión, la corrosión es un fenómeno multivariable y el seguimiento de las pérdidas de material por corrosión en estas estructuras se aborda mediante la implementación de sistemas de evaluación de campo no destructivos mediante equipos de medición electroquímica a distancia capaces de determinar in situ las tasas de corrosión del acero galvanizado y base e inferir de ellas la pérdida de sección.

Para la medición de la pérdida de material, se utilizan principalmente dos métodos: ensayos electroquímicos y ensayos no electroquímico. Aunque la corrosión es un proceso de naturaleza electroquímica, las técnicas predominantes para investigar el comportamiento de las estructuras metálicas enterradas son de índole no electroquímica. Dentro de estas técnicas, una de las pruebas más usuales consiste en evaluar la pérdida de masa de un metal. Este método implica colocar una muestra en un ambiente subterráneo durante un lapso de tiempo determinado. Previo a la introducción de la muestra en el suelo, se registra su peso inicial. Luego de transcurrir el periodo establecido, se exhuma la muestra y se vuelve a pesar. La diferencia entre ambos pesos ofrece la pérdida de masa originada por la corrosión.

Tanto los datos electroquímicos como los no electroquímicos, proporcionan metodologías que se pueden agrupar en dos categorías: métodos cualitativos y métodos cuantitativos.

Existen algunos términos que es necesario conocer para entrar en materia.

Suelo: [4] Porción más superficial de la corteza terrestre, constituida en su mayoría por residuos de roca provenientes de procesos erosivos y otras alteraciones físicas y químicas, así como de materia orgánica fruto de la actividad biológica que se desarrolla en la superficie.

Corrosión: Deterioro o disolución del metal o de sus propiedades por reacción química o electroquímica con el medio ambiente o masa de suelo. La corrosión es fundamentalmente un retorno de los metales a su estado original como óxidos y sales.[3]

Suelos corrosivos: Según [5] los suelos más corrosivos contienen grandes concentraciones de sales solubles, especialmente en forma de sulfatos, cloruros y bicarbonatos y pueden caracterizarse como muy ácidos (pH bajo) o muy alcalinos (pH alto). Los suelos arcillosos y limosos se caracterizan por una textura fina, una alta capacidad de retención de agua y, en consecuencia, por una mala aireación y un drenaje deficiente. También son propensos a ser potencialmente más corrosivos que los suelos de naturaleza gruesa, como la arena y la grava, donde hay una mayor circulación de aire.

Recubrimientos galvanizados: Un método común para proteger el metal base, el acero al carbono, de la corrosión es galvanizarlo mediante el uso de una capa de zinc en la superficie para proteger el acero subyacente. Las capas de zinc se depositan mediante el proceso de inmersión en caliente sumergiendo el miembro de acero en un baño de zinc fundido [2].

Acero al carbono: El acero al carbono o acero de construcción, es aquel que en su composición contiene diversos porcentajes de carbono, lo cual se vuelve vital para definir gran parte de sus propiedades mecánicas. Casi el 90% de los aceros conocidos son al carbono, por lo cual existen variaciones en estos, dado que a mayor cantidad de carbono sus propiedades mecánicas cambian, pues esto propicia el aumento de dureza y resistencia, pero disminuye su ductilidad, soldabilidad y elongación [2].

Estructuras de soporte de paneles solares: Estructuras diseñadas en perfilería tipo C, cuyas secciones dependerán de las cargas a las que están sometidas las estructuras, definiendo las dimensiones y espesores requeridos, con materiales en acero al carbono y acabados con galvanizado en caliente. El diseño de estas estructuras dependerá de factores como el panel solar, la cantidad de paneles por mesa, la velocidad de viento, la zona sísmica, la inclinación de la mesa, la distancia mínima del suelo al panel.

Suelos agresivos: Se identifican en términos de propiedades electroquímicas, incluido el pH, la resistividad y el contenido de sal como sulfatos, sulfuros.

Suelos alcalinos: Se describen como afectados por la presencia de sulfatos, sulfuros, sulfitos, más conocidos como sal (sódicos) o calcáreos. Los suelos sódicos generalmente se encuentran en regiones áridas y semiáridas donde la precipitación es baja y hay altas tasas de evaporación y transpiración.

Suelos sódicos: Se caracterizan por una baja permeabilidad y, por lo tanto, un flujo de agua restringido como los compuestos en su mayoría por suelos fino granulares como limos o arcillas. El pH de estos suelos es alto, generalmente >9 o 9,5, y las fracciones arcillosas y orgánicas están dispersas.

Suelos calcáreos: Son aquellos que contienen grandes cantidades de carbonato como la calcita (carbonato de calcio), dolomita (carbonato de calcio y magnesio), carbonatos de sodio y sulfatos como el yeso. Estos suelos se caracterizan por tener un pH alcalino, pero el pH es inferior a 8,5.

Suelos orgánicos: se clasifican en pantanos, turbas y estiércol, compuesto de materia orgánica. La mayoría de los suelos orgánicos están saturados durante la mayor parte del año, a menos que estén drenados.

Las condiciones de salinidad no solo se encuentran en los suelos debido a su composición química, sino también en el ambiente. Las concentraciones de sal pueden verse afectadas durante el servicio debido a la contaminación en ambientes marinos o usos industriales como cementeras. El suelo a lo largo de la costa a menudo contiene sal. La sal también puede introducirse directamente en el relleno reforzado donde las estructuras se construyen directamente frente al mar o cerca (es decir, durante eventos de marejadas ciclónicas). El aire en los ambientes costeros a menudo contiene un nivel de sal que puede depositarse en la superficie del suelo e introducirse en el suelo con el tiempo.

Resistividad: Medida de la resistencia que ofrece el suelo al paso de la electricidad. La resistividad del suelo depende de varios factores como el tipo de suelo, cantidad de humedad, composición química, compactación del material, temperatura, estratificación del suelo, mezcla de diferentes materiales, concentración y composición química de las sales disueltas, granulometría de las partículas, etc. Según [6] existen niveles de resistividad en términos de  $\Omega \cdot \text{cm}$  los cuales indican preliminarmente los niveles de corrosión.

Existen un sinnúmero de conceptos técnicos que vendrán siendo definidos a medida que se avanza la investigación.

En la industria y gracias a la cantidad de estudios realizados alrededor del mundo, se ha logrado generar alternativas de recubrimiento para mitigar la corrosión como:

Recubrimientos de Pintura: Aplicar pinturas anticorrosivas sobre la superficie metálica es una solución común. Estas pinturas actúan como barreras físicas entre el metal y el suelo, evitando el contacto directo con el electrolito. Además, algunos recubrimientos contienen pigmentos inhibidores de corrosión que retrasan la formación de óxidos como la pintura rica en zinc.

Galvanización: La galvanización implica recubrir el metal con una capa de zinc. El zinc es un metal más reactivo que el acero, por lo que actúa como ánodo sacrificio, protegiendo el metal base de la corrosión. La galvanización es efectiva en ambientes corrosivos y húmedos. Las capas de galvanizado suelen definirse de acuerdo con la necesidad de protección de la estructura y dependiendo del proceso pueden llevar a cabo varias inmersiones en las cubas de galvanizado.

Sistema dúplex: Proceso que consiste en una capa de pintura rica en zinc posterior a la galvanización en caliente del material.

Recubrimientos Epoxi y Poliméricos: Estos recubrimientos ofrecen una barrera protectora duradera y resistente. Los recubrimientos epoxi y poliméricos son resistentes a la abrasión, a los productos químicos y al agua, lo que los convierte en opciones ideales para estructuras en suelos corrosivos.

Revestimientos Cerámicos: Los recubrimientos cerámicos ofrecen una excelente resistencia a la corrosión y a la abrasión. Estos materiales pueden aplicarse en capas gruesas y proporcionar protección duradera en ambientes agresivos.

Recubrimientos de Poliuretano: Los poliuretanos ofrecen resistencia a la corrosión y a los rayos ultravioleta, lo que los hace adecuados para estructuras expuestas a condiciones climáticas extremas.

La corrosión del suelo es un desafío significativo para las estructuras metálicas cimentadas con hincado directo. Sin embargo, existen diversas alternativas de recubrimiento que pueden mitigar este problema y prolongar la vida útil de las estructuras. La elección del recubrimiento dependerá de factores como el ambiente, la durabilidad deseada y el presupuesto disponible. En última instancia, la implementación de estrategias de prevención de la corrosión es esencial para garantizar la seguridad y la integridad de las estructuras metálicas en entornos corrosivos.

## **6. Metodología de estudio**

Tipo de investigación

Cualitativa/Cuantitativa

El estudio se basará en la identificación desde el siglo XIX de la corrosión de las estructuras cimentadas en suelo hasta el día de hoy; identificando las características geotécnicas relevantes y los procedimientos actuales para la mitigación de la degradación de las estructuras.

Para complementar la investigación, se analizará un caso de estudio correspondiente a un proyecto de una granja solar en el municipio de Tuluá, Valle del Cauca, Colombia, donde se analizarán las características geotécnicas de la zona de implantación, la incidencia de la tipología del terreno, sus usos, las condiciones atmosféricas y el tipo de estructura cimentada.

## 7. Revisión del estado del arte

Los principales retos a nivel mundial son la energía, el agua y el aire. Contar con la energía suficiente para garantizar un nivel de vida razonable. El petróleo y el gas natural se transportan a través de continentes mediante tuberías de acero de alta presión que deben funcionar durante décadas sin fallas, para que ni el agua subterránea ni el aire se contaminen innecesariamente. La capacidad de gestionar la corrosión es una parte central del uso eficaz y eficiente de materiales para afrontar estos desafíos [7].

Uno de los grandes enemigos de las estructuras metálicas enterradas o cimentadas en los suelos es la degradación de los materiales producido por una reacción electroquímica con el suelo que las alberga. En el ámbito del diseño, funcionamiento y cuidado por ejemplo de plantas nucleares, es crucial abordar adecuadamente el control de la corrosión. La durabilidad de los materiales empleados en el manejo de desechos nucleares debe ser garantizada para preservar la seguridad de las generaciones venideras sin compromisos.

Es por eso por lo que, a lo largo de los años se ha identificado la necesidad de la protección de las estructuras enterradas que, como las tuberías de acero que transportan petróleo o gas natural, son importantes para el desarrollo y crecimiento y abastecimiento de las poblaciones.

Los suelos se caracterizan por estar en constante cambio y presentar una gran variabilidad en sus condiciones locales. Dos suelos geográficamente cercanos pueden tener características diferentes y condiciones corrosivas diferentes y, por tanto, degradar el acero con diferente agresividad [8].

La corrosión juega un papel crucial durante la etapa de diseño de estructuras metálicas debido a sus efectos en la integridad estructural. Si el acero no cumple con la vida útil requerida para la estructura, puede plantear serios riesgos para la salud pública y el medio ambiente. Además, esta corrosión afecta significativamente al análisis económico de las estructuras, aumentando los costos de fabricación y mantenimiento.

La investigación disponible sobre la corrosión del acero en entornos subterráneos revela la carencia de un método establecido para dimensionar estructuras metálicas enterradas. El ingeniero diseñador de la estructura debe estimar la cantidad de acero necesaria para cada proyecto. En general, se suele aplicar un espesor adicional al material durante el diseño acompañado de método de recubrimiento como el galvanizado en caliente para prevenir posibles fallos en la estructura.

Desde la utilización de los metales en la construcción, la literatura existente en concordancia con el tema de análisis muestra un bajo número de proyectos científicos destinados a analizar la corrosión de los suelos, radicando esto, en la variabilidad de las condiciones de los suelos lo que dificulta su estudio.

El suelo presenta una gran complejidad debido a las propiedades específicas de cada región y la influencia de factores externos en su composición [9]. Por ejemplo, la lluvia o la intervención humana pueden modificar considerablemente las características del suelo en relación con el acero. Por esta razón, es crucial analizar todas las variables pertinentes para evaluar de manera precisa el nivel de corrosión que experimentará el material.

Los enfoques empleados para prever la corrosión en estructuras metálicas enterradas pueden clasificarse en dos categorías principales: métodos cualitativos y cuantitativos. Los métodos cualitativos suelen consistir en tablas de evaluación que ofrecen una guía sobre los posibles efectos de la corrosión, aunque no proporcionan un valor específico para el diseño. Uno de los métodos cualitativos más ampliamente utilizados fue desarrollado por la Asociación Americana de Agua Potable (AWWA, por sus siglas en inglés) y se describe en la Norma AWWA C-105. Este método implica asignar puntos a diferentes variables del suelo relacionadas con la corrosión [10].

Al considerar los factores como resistividad, pH, Potencial redox, Sulfuros y humedad, y una vez sumado el puntaje referente a cada tipo de suelo, este método cataloga si la corrosión será leve, moderada, significativa o severa. Dependiendo del puntaje final, se determina si se necesitan medidas de protección adicionales, tales como galvanizado en caliente, pintura rica en zinc, espesores de sacrificio, entre otros. En contraste, los métodos cuantitativos establecen mediciones específicas o valores numéricos recomendados para la pérdida de metal en el suelo como resultado de la corrosión. Uno de los métodos más destacados en este ámbito son las tablas de Romanoff, reconocidas por su extensa duración y la amplia variedad de suelos estudiados en condiciones reales [5], [11].

Realizando el análisis a lo largo del tiempo, se describirán por décadas los hallazgos e investigaciones llevadas a cabo con el estudio de la corrosión y su impacto en las estructuras metálicas

En el Siglo XIX comienzan a surgir preocupaciones sobre la corrosión del acero enterrado en el suelo a medida que se expande la infraestructura de tuberías y estructuras subterráneas.

Las investigaciones sobre la corrosión del acero enterrado en el suelo fueron limitadas, pero surgieron preocupaciones sobre este fenómeno a medida que se expandía la infraestructura de tuberías y estructuras subterráneas. Aunque se desconocen los estudios documentados específicos de esa época, algunas observaciones y eventos históricos indican un interés incipiente en el problema.

Observaciones empíricas: Ingenieros y constructores de la época probablemente observaron fenómenos de deterioro en las estructuras metálicas enterradas, lo que los llevó a reconocer la necesidad de abordar la corrosión.

Primeros intentos de protección contra la corrosión: Aunque no existen registros específicos, es probable que algunos ingenieros y científicos hayan comenzado a experimentar con métodos para proteger el acero enterrado, como el uso de recubrimientos protectores o la aplicación de pinturas anticorrosivas.

Si bien no hay investigaciones documentadas específicas sobre la corrosión del acero enterrado en el suelo en el Siglo XIX, las preocupaciones iniciales sobre este problema sentaron las bases para la investigación más sistemática que se desarrollaría en el mismo siglo y más allá. La expansión de la infraestructura y la creciente dependencia de materiales metálicos en la construcción impulsaron la necesidad de comprender y mitigar los efectos de la corrosión en estas estructuras.

En la década comprendida entre 1950 y 1960 se destacaron avances importantes que incluyeron el desarrollo de técnicas para caracterizar la corrosividad del suelo, como la medición del PH, la resistividad y la presencia de ciertos iones en el suelo. Adicionalmente se realizaron estudios para

evaluar el efecto de variables como la humedad, la composición química del suelo y la presencia de microorganismos en la corrosión del metal [5], [7].

Desde esa época, se descubrió la situación en la que las corrientes eléctricas, más conocidas como electrolisis por corrientes errantes, no controladas o no deseadas circulan a través del suelo. Estas corrientes pueden originarse en diversas fuentes, como sistemas de distribución eléctrica, sistemas de transporte público o tuberías subterráneas, entre otras. Cuando estas corrientes atraviesan el suelo, pueden desencadenar reacciones electroquímicas que aceleran la corrosión de estructuras metálicas enterradas, como las tuberías de agua o gas. Este proceso puede resultar problemático al dañar infraestructuras subterráneas y dar lugar a costosas necesidades de mantenimiento [5]. La seriedad de la corrosión del suelo fue reconocida por el congreso de los Estados Unidos en 1910, cuando la National Bureau of Standards fue autorizado a realizar estudios de corrosión causados por las corrientes eléctricas errantes y sus posibles métodos de mitigación [12].

Las investigaciones en campo y laboratorio llevadas a cabo durante un periodo de 10 años indicaron que, aunque las corrientes eléctricas errantes eran la principal causa de la corrosión, también se ocurría por circunstancias diferentes y externas, concluyendo que el medio que albergaba dichas estructuras era en si corrosivas a partir de las características geotécnicas[5].

Aunque los inicios de los estudios iniciaron en los Estados Unidos, en el departamento de Bureau of Standards expandieron los estudios a otros países como Holanda, Alemania y Canadá, quienes publicaron sus resultados en la década comprendida entre 1950 y 1960.

Se identificaron algunas características geotécnicas relevantes que contribuyen a la corrosión de las estructuras metálicas enterradas como el PH, la resistividad, la humedad, la composición química de los suelos, las bacterias presentes en la composición propia del suelo junto con la caracterización e identificación de los suelos que abarcaron desde el desarrollo de sistemas de clasificación hasta estudios de mapeo y avances en técnicas analíticas, en diversos estudios; por mencionar algunos, se destacaron [13],[14] y [15].

En la década entre 1960 y 1970, estudios como [51], [52] investigaron los factores que afectan la corrosión del zinc en el suelo, un material comúnmente utilizado para proteger el acero de la corrosión, y [53] que examinó cómo la actividad microbiana en el suelo puede afectar la corrosión de metales enterrados, se centraron en áreas como las de técnicas de prevención, la comprensión de los mecanismos subyacentes de corrosión y la identificación de materiales más resistentes a la corrosión en entornos de suelo. Estas investigaciones ayudaron a mejorar la interacción entre los microorganismos del suelo y la corrosión de metales, ya que se descubrió que ciertos microorganismos pueden acelerar significativamente la corrosión de metales enterrados. Esto llevó al desarrollo de estrategias para controlar la actividad microbiana y mitigar su impacto en la corrosión. Además, durante este período se realizaron avances en la tecnología de recubrimientos protectores, con un enfoque en el desarrollo de recubrimientos más duraderos y efectivos para proteger los metales enterrados. También se investigaron métodos más eficaces de protección catódica, una técnica importante para prevenir la corrosión en estructuras enterradas.

En la década entre 1970-1980 Se desarrollan técnicas más avanzadas para estudiar y prevenir la corrosión del acero enterrado en el suelo, incluyendo métodos de revestimiento, protección catódica y aleaciones resistentes a la corrosión.

Se conocieron estudios como [54] donde se desarrollaron métodos para predecir la vida útil del acero enterrado en el suelo, considerando factores como la composición del suelo y las condiciones ambientales. Estos métodos pueden ayudar a planificar y diseñar estructuras subterráneas para una vida útil más prolongada.; [55] donde examinó la corrosión del hierro en suelos contaminados con productos derivados del petróleo, un problema común en áreas industriales; [56] donde investigó los factores que influyen en la corrosión del zinc en el suelo, un material utilizado para proteger el acero de la corrosión; [57] donde examinó cómo la actividad microbiana puede influir en la corrosión de metales enterrados en el suelo; [58] donde se examinaron varios aspectos de la corrosión en estructuras de acero enterradas, incluida la influencia de la composición del suelo y las condiciones de humedad en la tasa de corrosión. Se destacó la importancia de medidas de protección como el recubrimiento y el diseño adecuado para mitigar la corrosión en estas estructuras.

En la década entre 1980-1990 se destacaron estudios como [59] donde se revisaron los mecanismos de corrosión en estructuras de acero enterradas y discutió diferentes estrategias de protección contra la corrosión, como recubrimientos, sistemas de protección catódica y diseño adecuado de estructuras; [60] el cual examinó la corrosión del hierro y el zinc en diferentes tipos de suelo y evalúa los efectos de factores como la humedad y la composición química del suelo; [61] el cual examinó diferentes métodos de protección contra la corrosión para pilotes de acero utilizados en entornos marinos, destacando la eficacia de los sistemas de recubrimiento y la protección catódica para prolongar la vida útil de las estructuras; [62] donde se investigaron los métodos para controlar la corrosión en estructuras de acero enterradas, incluidas técnicas de diseño, selección de materiales y aplicaciones de recubrimiento, concluyendo que una combinación de estrategias es fundamental para garantizar una protección adecuada contra la corrosión.

En la década de 1990-2000 la investigación se enfoca en la mejora de las técnicas de monitoreo y detección temprana de la corrosión del acero enterrado, así como en la evaluación de su impacto ambiental.

Se destacaron estudios como [63], que, aunque el estudio se centra en la corrosión del acero en concreto, proporciona información relevante sobre los modelos matemáticos utilizados para predecir la corrosión en entornos agresivos; [64], el cual analizó los costos de la corrosión en los Estados Unidos y propone estrategias preventivas para reducir estos costos; [65] donde se examinaron los mecanismos de corrosión del acero embebido en concreto y se discutieron diversas estrategias de prevención, como el uso de aditivos inhibidores de corrosión y el diseño adecuado de las estructuras de concreto; [66] donde se revisaron diferentes métodos de protección contra la corrosión para estructuras de acero enterradas, incluyendo recubrimientos protectores, sistemas de protección catódica y diseño adecuado de estructuras; [67] donde se evaluó el comportamiento de la corrosión en pilotes de acero enterrados en suelos y se concluyó que la corrosión puede ser significativamente influenciada por la composición del suelo, el contenido de humedad y otros factores ambientales.

En principios del siglo XXI, se intensifican los esfuerzos internacionales para desarrollar estándares y normativas para la prevención de la corrosión del acero enterrado en el suelo, con el objetivo de garantizar la seguridad de las infraestructuras subterráneas.

En la década de 2000-2010 la investigación se centra en la aplicación de tecnologías emergentes, como sensores inteligentes y materiales avanzados, para mejorar la resistencia a la corrosión y prolongar la vida útil de las estructuras enterradas y se realizaron estudios como [68] se investigaron los mecanismos de corrosión en estructuras de acero enterradas en diferentes tipos de suelos y se concluyó que la composición del suelo, el contenido de humedad y la temperatura son factores críticos que influyen en la tasa de corrosión; [69] donde se examinaron los efectos de factores ambientales como la temperatura, la humedad y la composición del suelo en la corrosión de pilotes de acero enterrados, y se encontró que la corrosión puede ser significativamente acelerada en entornos agresivos; [70] desarrolló un método para evaluar y predecir la corrosión en tuberías de acero enterradas, utilizando técnicas de modelado y simulación, lo que puede ayudar en la gestión y mantenimiento de infraestructuras subterráneas; [71] donde se investigaron diferentes métodos de protección contra la corrosión para pilotes de acero enterrados, incluyendo recubrimientos protectores, sistemas de protección catódica y diseño adecuado de estructuras.

Durante la década de 2010 a 2020, se ha continuado avanzando en la comprensión de los mecanismos de corrosión del acero enterrado en el suelo, así como en el desarrollo de soluciones innovadoras y sostenibles para su prevención y mitigación. Se destacan varios estudios significativos, como [72] en el que se investigaron los factores que contribuyen a la corrosión de las tuberías de acero enterradas y se propusieron estrategias de mitigación, incluyendo el uso de recubrimientos protectores y técnicas de protección catódica. Otro estudio relevante es [73], que evaluó el comportamiento de corrosión del refuerzo de acero en el concreto expuesto a un ambiente marino e identificó medidas preventivas efectivas para reducir la corrosión. Además, [74] donde revisaron varios métodos de protección contra la corrosión para estructuras de acero enterradas, resaltando la importancia de una selección adecuada de materiales y técnicas de protección para garantizar la durabilidad de las estructuras. Por último, [75] donde investigaron el comportamiento de corrosión de los pilotes de acero enterrados en diferentes tipos de suelos y concluyeron que el diseño adecuado y el mantenimiento preventivo son clave para prolongar la vida útil de las estructuras.

## 8. Método de cálculo y predicción de la corrosión de estructuras de metálicas enterradas

Existen dos amplias clasificaciones de las técnicas empleadas para predecir la corrosión en estructuras metálicas subterráneas: métodos cualitativos y métodos cuantitativos.

### 8.1 Métodos cualitativos

Se consideran técnicas que brindan información sobre la capacidad corrosiva de los suelos, en función de las principales variables involucradas en la degradación. La información generalmente esta consignada en tablas o diagramas de fácil uso o interpretación, sin embargo, esa misma ventaja se convierte en una desventaja al no profundizar sobre la pérdida de espesor del material, y por tanto, no aportan valores numéricos relevantes acerca de la degradación corrosiva de los materiales a lo largo del tiempo.

Por lo anterior, lo métodos cualitativos están sujetos a la interpretación del ingeniero diseñador.

Los primeros estudios cualitativos sobre la corrosión en el suelo consideraron que la degradación dependía de una sola variable, que, a interpretación de los ingenieros de diseño, era la más importante en el fenómeno. A continuación, se detallarán los parámetros más representativos considerados como causantes de la corrosión en las estructuras metálicas

#### 8.1.1 Potencial Redox

También conocido como potencial de oxidación-reducción o potencial electroquímico, es una medida de la tendencia de un sistema a ganar o perder electrones cuando está sujeto a una reacción de oxidación-reducción (redox). En términos más simples, es una medida de la capacidad de un sistema para reducir u oxidar otras sustancias.

El potencial redox se mide en unidades de voltios (V) o milivoltios (mV) y se refiere al potencial eléctrico que se desarrolla en una celda electroquímica compuesta por dos semiceldas, una donde tiene lugar la reducción y otra donde ocurre la oxidación. La diferencia de potencial entre estas dos semiceldas se utiliza para determinar el potencial redox de la reacción [6].

**Tabla 1.**  
*Potencial Redox.* [3]

Potencial Redox (mV)	Grado de Corrosión
Menos de -200	Corrosión Severa
-200 a -100	Corrosión Moderada
-100 a 0	Corrosión Leve
0 a +100	Sin Corrosión (Pasivado)
Más de +100	Protección Catódica

*Nota:* Esta tabla indica los niveles de corrosión del suelo a partir del potencial Redox

### 8.1.2 Resistividad

Medida de resistencia que ofrece el suelo al paso de una corriente eléctrica. Con esta propiedad es posible identificar la composición y estructura del suelo, así como sus aplicaciones en geofísica, hidrología, agricultura y otros campos. Esta característica de los suelos puede variar según el contenido de humedad, la textura, presencia de sales o minerales, compactación, temperatura, entre otros. Es importante tener en cuenta que estos valores son solo aproximaciones y que la resistividad del suelo puede variar considerablemente incluso dentro de un mismo tipo de suelo debido a la heterogeneidad de este. Además, estos valores pueden cambiar significativamente con la profundidad y las condiciones ambientales [16].

**Tabla 2.**

*Nivel corrosión del suelo según resistividad. [17]*

Resistividad del suelo $\Omega.m$	Nivel de corrosión
>100	Muy levemente corrosivo
50.01-100	Levemente corrosivo
20.01-50	Moderadamente corrosivo
10.01-20	Severamente corrosivo
5.01-10	Extremadamente corrosivo
0-5	Extremadamente corrosivo

*Nota:* Esta tabla indica los niveles de corrosión del suelo a partir de la resistividad

### 8.1.3 PH

Es la medida del suelo que indica la acidez o alcalinidad del suelo. Esta medida se expresa en una escala de 0 a 12, siendo los valores por debajo de 7 los que indican un suelo ácido, valores de 7 un suelo neutro y valores mayores de 7 un suelo alcalino. [18]

**Tabla 3.**

*Nivel corrosión del suelo según PH.[18]*

PH	Nivel de corrosión
>12	Bajo
7.5-12	Moderado
4-7.5	Alto
<4	Muy alto

*Nota:* Esta tabla indica los niveles de corrosión del suelo a partir del PH

#### 8.1.4 EN 12501-2:2003

Norma europea que indica la protección de los materiales metálico contra la corrosión. Esta norma relaciona 3 niveles de corrosión en bajo, medio y alto

**Tabla 4.**

*Nivel corrosión del suelo según Resistividad y PH según EN 12501-2:2003.*

PH	Resistividad del suelo ( $\Omega.m$ )	Nivel de corrosión
<3.5		Alta
3.5-4.5	<4500	Alta
	>4500	Media-Alta
4.5-5.5	<4500	Alta
	4500-5000	Media-Alta
	>5000	Media
5.5-6.0	<1000	Alta
	1000-5000	Media-Alta
	5000-10000	Media
	>10000	Media-Baja
6.0-9.5	<1000	Alta
	1000-3000	Media-Alta
	3000-10000	Media
	10000-20000	Media-Baja
	>20000	Baja

*Nota:* Esta tabla indica los niveles de corrosión del suelo a partir del PH y la resistividad

Con el paso del tiempo y el descubrimiento de más parámetros, se optó por metodologías multivariadas en donde se les otorga puntuación a características del suelo. Este tipo de método destaca que las variables de entrada no tienen el mismo peso en la valoración, si no que en función de su relación con la agresividad corrosiva influyen más o menos en la suma final

#### 8.1.5 AWWA C-105

Método desarrollado por la Asociación Americana de Obras de Agua (AWWA-1972) y aprobado por el Instituto americano de Estándares Nacionales (ANSI), que considera que la resistividad, el PH y el potencial redox son los factores más influyentes en la corrosión.

**Tabla 5.**

*Nivel corrosión del suelo según multivariadas EN 12501-2:2003[19]*

Puntos	Resistividad del suelo ( $\Omega.m$ )	PH	Potencial Redox (Mv)	Sulfuros	Humedad
0	>3000	4-8.5	>100	Negativo	Buen drenaje
1	2500-3000				Drenaje justo
2	2500-2100	2-4		Huella	Drenaje pobre
3		>8.5			
3.5			50-100	Positivo	

4			0-5		
5	2100-1800	0-2	<0		
8	1800-1500				
10	<1500				

*Nota:* Esta tabla indica los niveles de corrosión del suelo a partir del PH, la resistividad, el potencial redox, sulfuros y humedad

### 8.1.6 Método DVGW

Técnica desarrollada y publicada en el año 2011 por la Asociación Alemana de Ingenieros de Obras de Agua y Gas que involucra las diferentes variables del suelo que afectan a la corrosión.

Según el método, si la suma final es 0 o superior, se considera un suelo no corrosivo, de 0 a -4 ligeramente corrosivo, de -5 a -10 corrosivo y por debajo de -10 altamente corrosivo.

**Tabla 6.**

*Nivel corrosión del suelo según multivariantes DIN50929-3 [20]*

ITEM	MEASURED VALUE		MARK
Soil Composition	Calcareous, marly limestone, sandy marl, not stratified sand		2
	Loam, sandy loam (loam content 75% or less), marly loam sandy clay soil (silt 75% or less)		0
	Clay, marly clay, humus		-2
	Peat, thick loam, marshy soil		-4
Ground water	None		0
	Exist		-1
	Vary		-2
Resistivity (Ohm.cm)	>	10000	0
	10000	5000	-1
	5000	2300	-2
	2300	1000	-3
	<	1000	-4
	<	20.00%	0
Moisture content (%)	>	20.00%	-1
	>	6	0
PH	<	6	-2
	None		0
Sulfide and hydrogen sulfide	Trace		-2
	Exist		-4
	>	5%	2
Carbonate	5%	1%	1

	<	1%	0
Chloride (mg/kg)	<	100	0
	>	100	-1
Sulphate (mg/kg)	<	200	0
	200	500	-1
	500	1000	-2
	>	1000	-3
Cinder and coke			0
			-4

*Nota:* Esta tabla indica los niveles de corrosión del suelo a partir múltiples variables

## 8.2 Métodos cuantitativos

La diferencia con los métodos cualitativos es que en los métodos cuantitativos se obtienen valores numéricos y sustentables respecto al comportamiento de la corrosión del suelo en el metal. Estos métodos cuantitativos se clasifican en tres grandes grupos: Métodos basado en datos de campo o laboratorio, métodos enfocados en la monitorización de la corrosión o métodos predictivos.

Para llevar a cabo algunos de los tres grupos anteriormente descritos, será necesario intentar replicar las condiciones del suelo en el laboratorio, condiciones que son muy complejas de conseguir, o tener el tiempo suficiente para monitorizar estructuras enterradas de prueba con el fin tomar mediciones obteniendo una minería de datos para construir modelos capaces de estimar la pérdida de espesor.

Uno de los proyectos científicos desarrollados in situ más destacado en la cuantificación del comportamiento corrosivo de los metales en el suelo, es que el que dirigió Romanoff entre 1910 y 1955 para la NBS. Sus estudios aun en 2024 gobiernan las ideas de cómo la corrosión ataca a las estructuras metálicas enterradas.

### 8.2.1 Modelo de cálculo Romanoff (1957)-Modelo FHWA-NHI-09-087

Los datos más completos disponibles en el campo de la corrosión subterránea son los resultados de extensas pruebas de campo en tuberías metálicas y chapas de acero enterradas por la Oficina Nacional de Estándares de los Estados Unidos (NBS) en programas originados ya en 1910 (Romanoff, 1957) [5]. Los datos adicionales incluyen los resultados de muchos estudios realizados en Estados Unidos sobre el comportamiento de las alcantarillas metálicas de las carreteras y los pilotes enterrados. Estos datos, generalmente cualitativos más que cuantitativos, concuerdan sustancialmente con las extensas pruebas de enterramiento realizadas por la NBS (NCHRP, 1978). Una conclusión general de los estudios mencionados es que la tasa de corrosión es mayor en los primeros años de enterramiento y luego se nivela a una tasa constante pero significativamente menor.

Basándose en estos estudios mencionados en el manual de la FHWA-NHI-09-087 (2009) [2], Romanoff, 1957 en NBS (National Bureau of Standards) Circular 579 sugirió la siguiente ecuación

exponencial para predecir la cantidad de corrosión general en algún momento (t) después del enterramiento:

$$x = K t^n$$

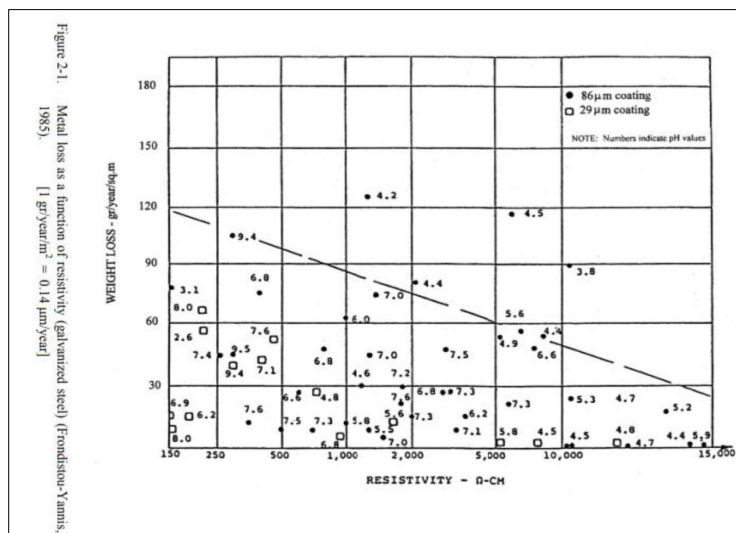
Donde  $x$  es la pérdida de material en el tiempo  $t$  y  $K$  y  $n$  son constantes que dependen del suelo y del sitio.

Para aceros de baja aleación y carbono en varias condiciones de enterramiento en el suelo, NBS determinó una constante "n" que varía de 0.5 a 0.6 y constantes "K" entre 150 y 180  $\mu\text{m}$  al final del primer año. Para los aceros galvanizados, las constantes "n" no fueron evaluadas, pero se pueden inferir constantes "K" que varían de 5 a 70  $\mu\text{m}$ .

Los resultados de pruebas de laboratorio francesas cuidadosamente controladas, que simulan condiciones de entierro en campo, sugieren fuertemente que para el rango de rellenos utilizados en aplicaciones de MSE, la constante "n" puede tomarse como 0.60 para el acero galvanizado mientras el revestimiento de zinc esté presente y de 0.65 a 1 para el acero al carbono una vez que ocurre una corrosión significativa (Darbin et al., 1986). La constante K calculada al final del primer año para el acero galvanizado se encontró que variaba entre 3 y 50; con los valores más altos consistentes con suelos caracterizados por bajas resistividades y las concentraciones más altas de cloruros y sulfatos.

Como se indica en la Figura 1, existen dos tipos de recubrimientos de galvanizado en cuestión de micras o espesor de capa de zinc que se define en  $\bullet 86\mu\text{m}$  o  $\square 29\mu\text{m}$  y se indica como nota anexa, que los valores numéricos que acompañan los tipos de recubrimiento corresponden a valores de pH como variable de identificación de la acidez o alcalinidad del suelo.

**Figura 1.**  
Pérdida de material en función de la resistividad



Nota: Esta gráfica asocia la pérdida de material en función de la resistividad

Es posible entrar en la gráfica con los datos de resistividad del terreno obtenidos de los ensayos geotécnicos en términos de  $\Omega \cdot \text{cm}$  y cortando con la curva o línea de tendencia en el eje Y obtenemos el dato de pérdida de material en términos de  $\text{gr}/\text{year}/\text{sq. m}$ .

Donde  $\text{gr}/\text{year}/\text{sq. m}$  equivale a  $0.14 \mu\text{m}/\text{year}$ .

Con la anterior ecuación será posible determinar en micras, la cantidad de pérdida de material en el primer año del contacto de la estructura metálica enterrada.

Posteriormente, y considerando un factor de  $n = 0.6$  para el acero galvanizado (Darbin et al., 1986), será posible mediante formulación matemática, obtener el valor  $K$ , el cual debe equivaler a una constante entre 3 y 50 para el primer año.

Conociendo la capa de galvanizado que tendrá la estructura que por norma internacional se debe considerar un valor no menor a  $70 \mu$ , será posible obtener el valor de  $t$ , el cual corresponde a la cantidad de corrosión general.

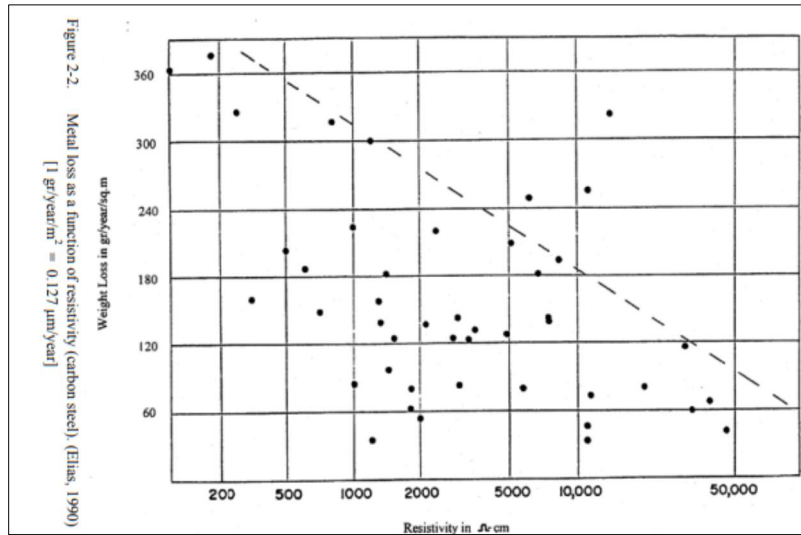
Por lo anterior y solo conociendo el valor de la resistividad, será posible estimar el tiempo o la vida útil que tendrá la estructura solo con la capa de galvanizado considerada.

Según el modelo descrito en [2] es posible inicialmente determinar el nivel de corrosión del suelo, catalogándolo desde no corrosivo hasta muy corrosivo, donde entran a considerarse datos obtenidos a partir de ensayos químicos en las muestras de suelo como cloruros y sulfatos apoyados en la norma ASTM D4327 [21].

Adicionalmente, y posterior a ensayos químicos de los químicos también es posible conocer el PH de los mismo, donde evaluando en la misma gráfica considerada en la Figura 1 del presente documento, en conjunto con el valor de resistividad y capa de galvanizado considerada, es posible determinar el valor de pérdida del material, conociendo más a detalle las condiciones a las que estará expuesta la estructura metálica.

Sin embargo, como el fin de estas predicciones es evaluar las condiciones de vida útil de la estructura, en algunos casos, e identificando las restricciones de los proyectos, el acero como material principal, también es evaluado. Lo anterior con el fin de conocer o estimar el sobreespesor de material que la estructura enterrada deberá llevar.

**Figura 2.**  
*Pérdida de metal en función de la resistividad*



*Nota:* Esta gráfica asocia la pérdida de material en función de la resistividad

Es posible entrar en la gráfica definida en la Figura 2, con los datos de resistividad del terreno obtenidos de los ensayos geotécnicos en términos de  $\Omega \cdot \text{cm}$  y cortando con la curva o línea de tendencia en el eje Y obtenemos el dato de pérdida de material en términos de  $\text{gr}/\text{year}/\text{m}^2$

Donde  $\text{gr}/\text{year}/\text{m}^2$  equivale a  $0.127 \mu\text{m}/\text{year}$ .

Con la anterior ecuación será posible determinar en micras, la cantidad de pérdida de material, considerando a su vez la pérdida de material de la capa de galvanizado impresa y la vida útil del proyecto, donde se obtendrá el valor en años que la estructura principal, es decir, el acero en su condición natural deberá permanecer en pie.

Este valor, entre la pérdida de material en  $\mu/\text{año}$  multiplicado por los años que el acero deberá permanecer, dará indicios de la capa en micras ( $\mu$ ) que se deberá tener en cuenta en sobreespesor de material.

Este método describe, en proyectos como las estructuras metálicas de soporte de paneles solares, objeto de este estudio, la capa de galvanizado, y el espesor de sacrificio o sobreespesor de material que deberá considerarse para cumplir con las expectativas de vida útil de los proyectos.

Para el estudio de los niveles de corrosión a los que están sometidas las estructuras metálicas, la corrosión por el suelo no es la única variable por considerar. La corrosión ambiental también es fundamental a la hora de la evaluación y definición de la protección de los metales mediante galvanizado en caliente.

Según la normativa UNE-EN ISO 14713-1 [22] se describe los entornos atmosféricos típicos relacionados con la estimación de las categorías de corrosividad, donde dependiendo de la zona

del proyecto se clasifica desde C1 a CX el nivel de corrosión y se define la tasa de corrosión para el zinc (basada en exposiciones de un año)

**Tabla 7.**  
Nivel corrosión ambiental UNE-EN ISO 14713-1:2009 [22]

Corrosivity category C Corrosion rate for zinc (based upon one-year exposures), $r_{corr}$ ( $\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ ) and corrosion level	Typical environments (examples)	
	Indoor	Outdoor
C1 $r_{corr} \leq 0,1$ Very low	Heated spaces with low relative humidity and insignificant pollution, e.g. offices, schools, museums	Dry or cold zone, atmospheric environment with very low pollution and time of wetness, e.g. certain deserts, central Arctic/Antarctica
C2 $0,1 < r_{corr} \leq 0,7$ Low	Unheated spaces with varying temperature and relative humidity. Low frequency of condensation and low pollution, e.g. storage, sport halls	Temperate zone, atmospheric environment with low pollution ( $\text{SO}_2 < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e.g.: rural areas, small towns. Dry or cold zone, atmospheric environment with short time of wetness, e.g. deserts, sub-arctic areas
C3 $0,7 < r_{corr} \leq 2.1$ Medium	Spaces with moderate frequency of condensation and moderate pollution from production process, e.g. food-processing plants, laundries, breweries, dairies	Temperate zone, atmospheric environment with medium pollution ( $\text{SO}_2$ : $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) or some effect of chlorides, e.g. urban areas, coastal areas with low deposition of chlorides, subtropical and tropical zones with atmosphere with low pollution
C4 $2.1 < r_{corr} \leq 4.2$ High	Spaces with high frequency of condensation and high pollution from production process, e.g. industrial processing plants, swimming pools	Temperate zone, atmospheric environment with high pollution ( $\text{SO}_2$ : $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) or substantial effect of chlorides, e.g. polluted urban areas, industrial areas, coastal areas without spray of salt water, exposure to strong effect of de-icing salts, subtropical and tropical zones with atmosphere with medium pollution
C5 $4.2 < r_{corr} \leq 8.4$ Very high	Spaces with very high frequency of condensation and/or with high pollution from production process, e.g. mines, caverns for industrial purposes, unventilated sheds in subtropical and tropical zones	Temperate and subtropical zones, atmospheric environment with very high pollution ( $\text{SO}_2$ : $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and/or important effect of chlorides, e.g. industrial areas, coastal areas, sheltered positions on coastline
CX $8.4 < r_{corr} \leq 25$ Extreme	Spaces with almost permanent condensation or extensive periods of exposure to extreme	Subtropical and tropical zones (very high time of wetness), atmospheric environment with very high pollution ( $\text{SO}_2$ higher than $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), including accompanying and

	<p>humidity effects and/or with high pollution from production process, e.g. unventilated sheds in humid tropical zones with penetration of outdoor pollution including airborne chlorides and corrosion-stimulating particulate matter</p>	<p>production pollution and/or strong effect of chlorides, e.g. extreme industrial areas, coastal and offshore areas with occasional contact with salt spray</p>
--	---	--

NOTE 1 Deposition of chlorides in coastal areas is strongly dependent on the variables influencing the transport inland of sea-salt, such as wind direction, wind velocity, local topography, wind sheltering islands beyond the coast, distance of the site from the sea, etc.

NOTE 2 Extreme influence of chlorides, which is typical of marine splashing or heavy salt spray, is beyond the scope of ISO 9223.

NOTE 3 Corrosivity classification of specific service atmospheres, e.g. in chemical industries, is beyond the scope of ISO 9223.

NOTE 4 Sheltered and not rain-washed surfaces, in a marine atmospheric environment where chlorides are deposited, can experience a higher corrosivity category due to the presence of hygroscopic salts.

NOTE 5 In environments with an expected "CX category", it is recommended to determine the atmospheric corrosivity classification from one year corrosion losses. ISO 9223 is currently under revision; category "CX" will be included in the revised document.

NOTE 6 The concentration of sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) should be determined during at least 1 year and is expressed as the annual average.

NOTE 7 Detailed descriptions of types of indoor environments within corrosivity categories C1 and C2 is given in ISO 11844-1. Indoor corrosivity categories IC1 to IC5 are defined and classified.

NOTE 8 The classification criterion is based on the methods of determination of corrosion rates of standard specimens for the evaluation of corrosivity (see ISO 9226).

NOTE 9 The thickness-loss values are identical to those given in ISO 9223, except that, for rates of 2 µm (per year) or more, the figures are rounded to whole numbers.

NOTE 10 The zinc reference material is characterized in ISO 9226.

NOTE 11 Corrosion rates exceeding the upper limits in category C5 are considered as extreme. Corrosivity category CX refers to specific marine and marine/industrial environments.

NOTE 12 To a first approximation, the corrosion of all metallic zinc surfaces is at the same rate in a particular environment. Iron and steel will normally corrode 10 to 40 times faster than zinc, the higher ratios usually being in high-chloride environments. The data is related to data on flat sheet given in ISO 9223 and ISO 9224.

NOTE 13 Change in atmospheric environments occurs with time. For many regions, the concentrations of pollutants (particularly SO<sub>2</sub>) in the atmosphere have reduced with time. This has led to a lowering of the corrosivity category for these regions. This has, in turn, led to the zinc coatings experiencing lower corrosion rates compared to historical corrosion performance data. Other regions have experienced increasing pollution and industrial activity and therefore would be expected to develop environments more accurately described by higher corrosivity categories.

*Nota:* Clasificación corrosión ambiental

## 9. Casos de estudio

Los análisis en los casos de estudio se han llevado a cabo teniendo en cuenta las siguientes normas y documentos de referencia.

**Tabla 8.**

*Normas y documentos de referencia para casos de estudio*

<b>NORMATIVA:</b>	ISO 9223:2012 "CORROSION OF METALS AND ALLOYS – CORROSIVITY OF ATMOSPHERES- CLASSIFICATION, DETERMINATION AND ESTIMATION".  ISO 9224:2012 "CORROSION OF METALS AND ALLOYS – CORROSIVITY OF ATMOSPHERES- GUIDING VALUES FOR THE CORROSIVITY CATEGORIES".  ISO 9225:2012 "CORROSION OF METALS AND ALLOYS – CORROSIVITY OF ATMOSPHERES- MEASUREMENT OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS AFFECTING CORROSIVITY OF ATMOSPHERES".  ISO 9226:2012 "CORROSION OF METALS AND ALLOYS – CORROSIVITY OF ATMOSPHERES- DETERMINATION OF CORROSION RATE OF STANDARD SPECIMENS FOR THE EVALUATION OF CORROSIVITY".
-------------------	--

### 9.1 Caso de estudio PLANTA FOTOVOLTÁICA TULUÁ

El objetivo de este análisis es justificar los tratamientos de acabado en función de la corrosión del terreno aplicada a la estructura calculada por Solar Steel Gonvarri industries para su instalación en la planta fotovoltaica TULUÁ, situada en Valle del Cauca, Colombia.

**Tabla 9.**

*Ubicación geográfica proyecto planta fotovoltaica TULUÁ*

<b>NOMBRE PROYECTO:</b>	Tuluá
<b>LOCALIZACIÓN:</b>	Valle del Cauca
<b>PAÍS:</b>	Colombia
<b>LATITUD</b>	4°2'19.29" N
<b>LONGITUD</b>	76°11'8.02" O

*Nota: Caso de estudio TULUA*

El análisis se realizará para los años de garantía de corrosión de la estructura. En este caso se verificará para 25 años.

El análisis se ha llevado a cabo teniendo en cuenta las siguientes normas y documentos de referencia, propias del proyecto.

**Tabla 10.**

Documentos de referencia proyecto planta fotovoltaica TULUÁ

<b>DOCUMENTACIÓN DE REFERENCIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geotécnico: “ESTUDIO DE SUELOS Y GEOTECNIA PARQUE FOTOVOLTAICO TULUA R01”.</li> </ul>
------------------------------------	--

Nota: Documentos de referencia proyecto planta fotovoltaica TULUÁ

**Tabla 11.**

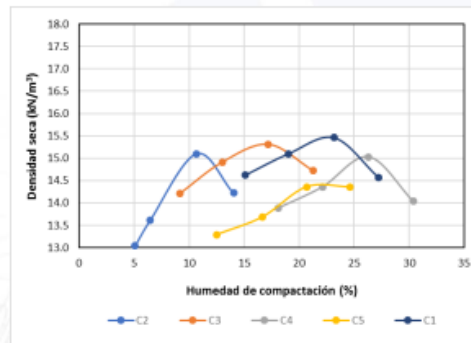
Parámetros empleados proyecto planta fotovoltaica TULUÁ

Perforación	No.	Profundidad (m)		Prof. (m)	USCS (-)	Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)	Pasa No. 200 (%)	Wn (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)	MO (%)	P.U. (g/cm <sup>3</sup> )	Dispersión (Grado)	Gs (20°C)
		De	A															
1	1 a 4	0.00	2.00	1.00	CH	-	-	-	97	23.50	74	31	43	7	8.6	1.742	4	2.256
1	5 a 8	2.00	4.00	3.00	CH	3	23	74	-	29.20	74	32	42	16	9.1	1.682	4	2.233
2	1 a 4	0.00	2.25	1.13	CH	10	8	82	-	29.20	78	30	48	10	6.3	1.907	3	2.141
3	3 a 6	0.80	4.50	2.65	CH	0	7	93	-	35.90	80	35	45	26	8.0	1.626	4	2.432
4	1 a 2	0.00	1.00	0.50	CH	1	20	79	-	20.80	79	34	45	12	6.1	1.760	4	2.213

Tipo de Material	Profundidad	Resultado promedio de cloruros (mg/kg)	Resultado promedio de sulfatos (%)
CH	De 0 a 6 m	5.58	0.26

Exploración	Muestra	Profundidad		Tipo de material	Ph (-)
		Inicio (m)	Fin (m)		
S1	1	0.00	0.50	CH	7.09
S1	8	3.50	4.00	CH	6.59
S2	4	1.75	2.25	CH	7.46
S3	4	2.30	2.80	CH	7.17
S4	1	0.00	0.50	CH	7.83

Apique	No.	Profundidad (m)		P.U.S. Máx. kN/m <sup>3</sup>	Humedad óptima (%)
		De	A		
C1	1	0.0	3.0	15.47	22.7
C2	1	0.0	3.0	15.10	10.9
C3	1	0.0	3.0	15.30	17.0
C4	1	0.0	3.0	15.03	26.0
C5	1	0.0	3.0	14.41	22.0

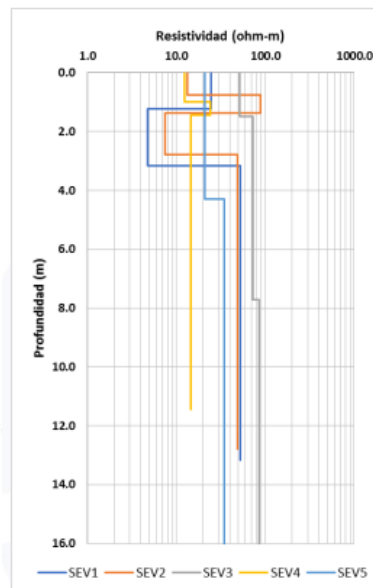


Exploración	Muestra	Profundidad		Alcalinidad	Sulfitos	Sulfuros
		Inicio (m)	Fin (m)	mg/kg	mg/kg	mg/kg
S1	1	0.00	0.50	194.87	0.00	1.51
S1	8	3.50	4.00	82.1	0.00	0.00
S2	4	1.75	2.25	217.4	0.00	0.00
S3	4	2.30	2.80	173.3	0.00	0.00
S4	1	0.00	0.50	109.3	0.00	9.08

## 7. Nivel freático

En todos los sondeos realizados se encontró presencia de nivel freático como se puede evidenciar en la Tabla 9, de manera que el nivel freático para efectos de diseño será de 8.0 metro, este valor fue el más cercano a la superficie.

Con relación a las estructuras metálicas la resistividad del suelo está por debajo de los 2000 ohm-cm, suelo no homogéneo, de grano medio y PH mayor que 4, por lo tanto, hay muy baja posibilidad de corrosión uniforme según la Figura 30. De acuerdo con (FHWA-NHI-16-009, 2016) y la Figura 31 no se necesitan pruebas de corrosión y no se prevén problemas de corrosión, sin embargo se evaluó la corrosión de acuerdo con la norma (UNE-EN-ISO-14713, 2017) para la corrosión atmosférica y se consideró una categoría de corrosividad de C5, con una tasa de corrosión que varía entre 8.4 a 4.2 micrómetros por año. Esta categoría definida para ambientes de zonas templadas y subtropicales.



Exploración	Muestra	Profundidad		Tipo de material	Ph
		Inicio (m)	Fin (m)		(-)
S1	1	0.00	0.50	CH	7.09
S1	8	3.50	4.00	CH	6.59
S2	4	1.75	2.25	CH	7.46

Fuente: Estudio geotécnico proyecto Tuluá [23]

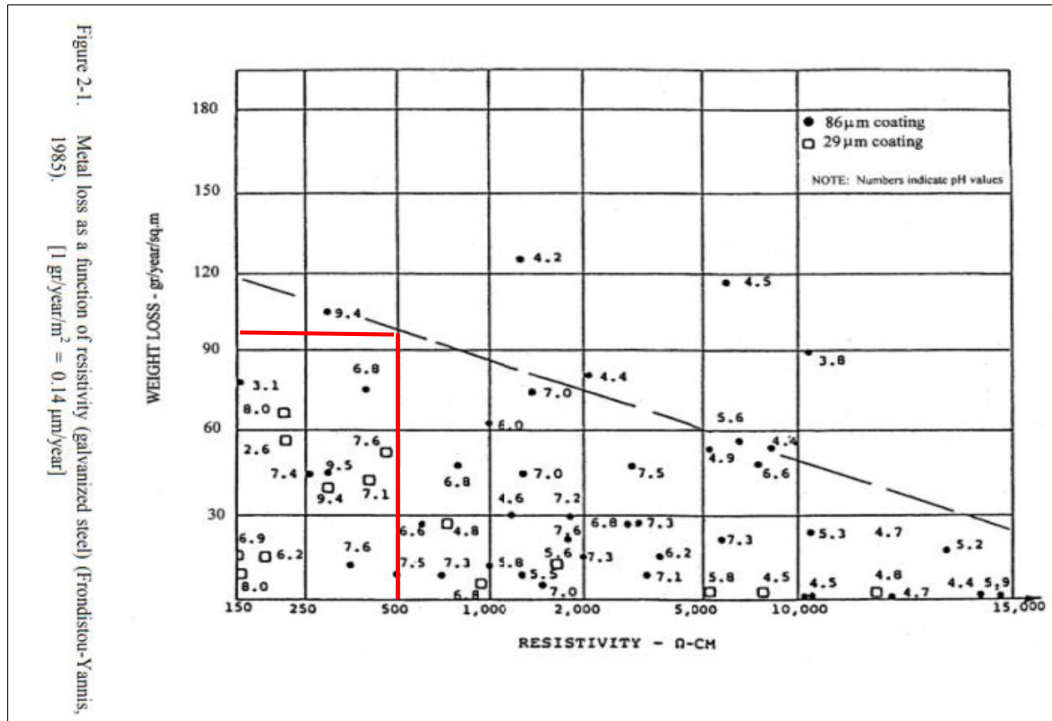
*Nota:* Parámetros empleados proyecto planta fotovoltaica TULUÁ

Teniendo en cuenta la información facilitada en el geotécnico, los datos introducidos en la modelización son los siguientes

Verificación mediante Modelo Romanoff-FHWA [2]

Considerando que la resistividad entre menor valor hace alusión a más corrosividad del suelo y que según el informe se presentaron resistividades entre 5 y 90 ohm.m, se realiza el análisis para la condición más desfavorable de 5 ohm.m equivalente a 500 ohm.cm

**Figura 3.**  
 Pérdida de material en función de la resistividad-TULUÁ



Nota: Pérdida de material en función de la resistividad

Indicando un valor de resistividad de 500 Ω.cm, se obtiene un valor de 100 gr/year/sq.m

Donde,

$$100 \text{ gr/year/m}^2 * 0.14 \text{ μm/año} = 14 \text{ μm/año}$$

$$14 \text{ años} = K * 1^{0.6}$$

$$K = 14$$

Para una capa de galvanizado de 100 μm

$$100 \text{ μm} = 14 * t^{0.6}$$

$$\frac{100}{14} = t^{0.6}$$

$$\ln \frac{100}{14} = \ln t^{0.6}$$

$$\ln \frac{100}{14} = 0.6 \ln t$$

$$t = e^{\left(\frac{\ln\left(\frac{100}{14}\right)}{0.6}\right)}$$

$$t = 26.49 \text{ años}$$

Por lo anterior, de manera general y solo contando con datos de resistividad, se establece que la vida útil de la capa de galvanizado será de 26.49 años, cumpliendo con lo solicitado de 25 años.

Sin embargo, considerando que se cuenta con información más detallada de los suelos de la zona del proyecto, a continuación, se determina la estimación de la velocidad de corrosión para la capa de galvanizado en caliente y acero.

Con el fin de analizar toda la información geotécnica compartida, se analizan las demás características químicas en la zona de implantación del proyecto planta fotovoltaica TULUÁ

**Tabla 12.**

*Resultados modelo galvanizado proyecto planta fotovoltaica TULUÁ*

Soil Corrosivity (German Gas and Water Works Engineers Association).						
ITEM	EXIST	MEASURED VALUE		MARK		
Soil Composition	NO	Calcareous, marly limestone, sandy marl, not stratified sand		2	0	
	SI	Loam, sandy loam (loam content 75% or less), marly loam sandy clay soil (silt 75% or less)		0	0	
	NO	Clay, marly clay, humus		-2	0	
	NO	Peat, thick loam, marshy soil		-4	0	
Ground water	SI	None		0	0	
	NO	Exist		-1	0	
	NO	Vary		-2	0	
Resistivity (Ohm.cm)	SI	1000,00	>	10000	0	0
			10000	5000	-1	0
			5000	2300	-2	0
			2300	1000	-3	-3
			<	1000	-4	0
Moisture content (%)	SI	19,72%	<	20,00%	0	0
			>	20,00%	-1	0
PH	SI	7,00	>	6	0	0
			<	6	-2	0
Sulfide and hydrogen sulfide	SI	None		0	0	
	NO	Trace		-2	0	
	NO	Exist		-4	0	
Carbonate	NO	0,00%	>	5%	2	0
			5%	1%	1	0
			<	1%	0	0
Chloride (mg/kg)	SI	5,58	<	100	0	0
			>	100	-1	0
Sulphate (mg/kg)	NO		<	200	0	0
			200	500	-1	0
			500	1000	-2	0
			>	1000	-3	0
Cinder and coke	NO	None		0	0	
	NO	Exist		-4	0	
				<b>Slightly Corrosive</b>	<b>-3</b>	

SOIL RATING	
0 or above	Non-corrosive
0 to -4	Slightly Corrosive
-5 to -10	Corrosive
-10 or less	Highly Corrosive

*Nota:* Resultados modelo galvanizado proyecto planta fotovoltaica TULUÁ

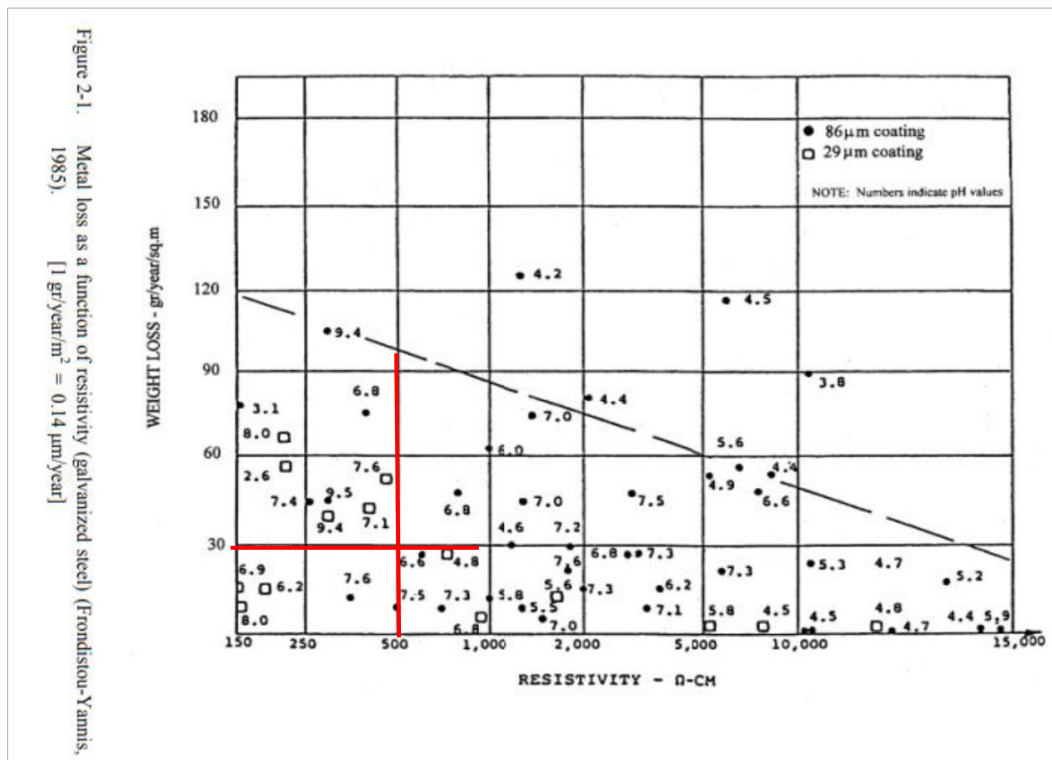
Como puede verse y en consistencia con los comentarios del informe geotécnico, el suelo se cataloga como no corrosivo o ligeramente corrosivo.

De acuerdo con el modelo usado en [2], se estima que con un valor de resistividad de 500 ohm-cm el suelo presente en el proyecto se cataloga como corrosivo, sin embargo, la existencia de sulfatos,

sulfuro y cloruro también aportan o disminuyen a la estimación de la corrosión. En este caso, el suelo realmente se cataloga como ligeramente corrosivo.

Considerando adicionalmente de la resistividad de 500 ohm.cm, el suelo presenta de manera general un pH de 7 y un recubrimiento de galvanizado de 100µm.

**Figura 4.**  
*Pérdida de material en función de la resistividad. Proyecto TULUÁ*



*Nota:* Pérdida de material en función de la resistividad. Proyecto TULUÁ

Considerando un valor de resistividad de 500 ohm-cm, PH de 7, la pérdida de peso (gr/año/m<sup>2</sup>) según la gráfica correspondería a un valor aproximado de 10.

Donde,

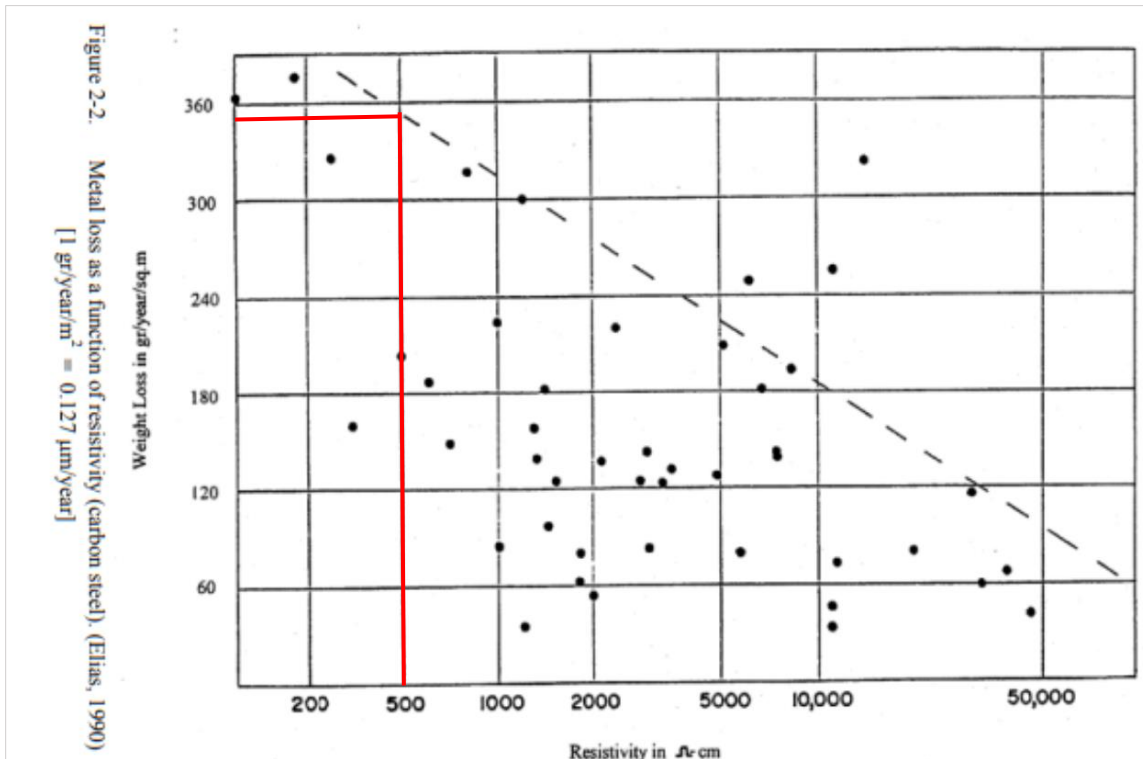
$$30 \text{ gr/year/m}^2 * 0.14 \text{ µm/año} = 4,2 \text{ µm/año}$$

Para capa de galvanizado de 100µ

$$\frac{100 \text{ µm}}{4,2 \frac{\text{µm}}{\text{año}}} = 23,8 \text{ años}$$

Continuando con el análisis, es vital considerar el espesor adicional de acero requerido para alcanzar los 25 años de vida útil de la estructura.

**Figura 5.**  
*Pérdida de metal en función de la resistividad. Proyecto TULUÁ*



Nota: Pérdida de material en función de la resistividad. Proyecto TULUÁ

Considerando un valor de resistividad de 500 ohm-cm, la pérdida de peso  $gr/year/m^2$  según la gráfica correspondería a un valor aproximado de 350

$$350 (gr/year)/m^2 * 0.127 \mu m/año = 44,45 \mu m/año$$

Considerando una vida útil de 25 años y un desgaste de galvanizado de 100 μm en 23,8 años, el acero deberá resistir una totalidad de 1,2 años.

$$44,45 \mu m/año * 1,2 años = 53.34 \mu m = 0.05mm * 2 = 0.1mm$$

En el análisis de los pilares o estructura enterrada se ha considerado una sección reducida finalmente con un espesor de sacrificio de 100 micras (0.1mm) perimetral, es decir 0.2mm totales considerando perfiles tipo C, desde el punto de vista más desfavorable que nos aporta una mayor protección a la corrosión del terreno y los cuales cubrirían la necesidad para una vida útil total de la estructura de 25 años.

## 9.2 Caso de estudio PLANTA FOTOVOLTAICA RUBIALES

El objetivo de este análisis es justificar los tratamientos de acabado en función de la corrosión del terreno aplicada a la estructura calculada por Solar Steel Gonvarri industries para su instalación en la planta fotovoltaica RUBIALES, situada en Campo Rubiales, Colombia.

**Tabla 13.**

*Ubicación geográfica proyecto planta fotovoltaica RUBIALES*

<b>NOMBRE PROYECTO:</b>	Rubiales
<b>LOCALIZACIÓN:</b>	Campo Rubiales
<b>PAÍS:</b>	Colombia
<b>LATITUD</b>	3°47'38.55" N
<b>LONGITUD</b>	71°27'5.60" O

*Nota:* Caso de estudio RUBIALES

El análisis se realizará para los años de garantía de corrosión de la estructura. En este caso se verificará para 30 años.

El análisis se ha llevado a cabo teniendo en cuenta las siguientes normas y documentos de referencia, propias del proyecto.

**Tabla 14.**

*Documentos de referencia proyecto planta fotovoltaica RUBIALES*

<b>DOCUMENTACIÓN DE REFERENCIA</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Geotécnico: "ESTUDIO GEOTÉCNICO PSFV RUBIALES I&amp;II, COLOMBIA REV03".</li></ul>
------------------------------------	--

*Nota:* Documentos de referencia proyecto planta fotovoltaica RUBIALES

**Tabla 15.**

*Parámetros empleados proyecto planta fotovoltaica RUBIALES*

De cara a evaluar la sectorización de las parcelas en función de los valores de resistividad eléctrica, se ha realizado interpolación de los valores promedio obtenidos a 0,5 m y a 1,0 m de profundidad, en las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos, observando que en las parcelas norte se obtienen valores de resistividad entre 80-200  $\Omega \cdot m$ , aumentando en las parcelas sur hasta valores entre 115-300  $\Omega \cdot m$ .

Calicata	Muestra	Prof. (m)	Químicos sobre muestra de suelo								
			pH	Sales Solubles (%)	Materia orgánica (%)	Cloruros Cl- (%)	Sulfatos SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (%)	Sulfuros S- (mg S <sub>2</sub> -/kg)	Capacidad buffer		Grado de acidez Baumann Gully (ml/kg)
									Acidez hasta pH 4,3 (mmol/kg)	Alcalinidad hasta pH 7,0 (mmol/kg)	
TP-01	PARAFINADA	1,50	4,65	0,23	1,9	0,0006	0,225	<4	2	154,58	270
TP-05	PARAFINADA	1,50			1,4						
TP-11	PARAFINADA	0,50	4,66	0,22	1,0	0,0006	0,232	<4	3,2	18,33	300
TP-17	PARAFINADA	1,50	4,88	0,24	1,7	0,0008	0,135	<4	1,96	43,82	300
TP-21	PARAFINADA	0,60	5,09	0,26	1,5	0,0008	0,119	<4	0,92	9,16	242
TP-23	PARAFINADA	0,50			1,8						
TP-24	SACO	2,80			0,9						
TP-29	PARAFINADA	1,60			1,6						

<b>Nº datos</b>	4	4	8	4	4	4	4	4	4
<b>Máximo</b>	5,09	0,26	1,90	0,00	0,23		3,20	154,58	300,00
<b>Mínimo</b>	4,65	0,22	0,90	0,00	0,12		0,92	9,16	242,00
<b>Promedio</b>	4,82	0,24	1,48	0,00	0,18	<4	2,02	56,47	278,00
<b>Dev. Est.</b>	0,21	0,02	0,36	0,00	0,06	0,00	0,93	67,03	27,86

Tabla 9: Resultados de laboratorio de clasificación sobre muestras de calicata.

Calicata	Muestra	Prof. (m)	Granulometría por tamizado (%)					Límites Atterberg			Clasificación Suelos		Densidad			Humedad (%)
			% Pasa #19 mm Nº4	% Pasa #4,75 mm Nº10	% Pasa #2 mm Nº10	% Pasa #0,425 mm Nº40	% Pasa #0,075 mm Nº200	LL (%)	LP (%)	IP (%)	USCS	AASHTO	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad partículas sólidas (g/cm <sup>3</sup> )	
TP-01	PARAFINADA	1,50	100,0	94,4	89,4	86,9	63,9	31,1	14,8	16,3	CL	A-6	2,033	1,738		17
TP-03	SACO	0,50	100,0	99,6	98,6	96,5	85,5	59,0	22,4	36,6	CH	A-7-6				
TP-05	PARAFINADA	1,50	100,0	98,8	95,6	92,4	69,7	27,5	14,1	13,4	CL	A-6	2,000	1,730	2,672	15,6
TP-07	PARAFINADA	0,60	100,0	97,5	94,3	92,0	66,7	27,7	16,8	10,9	CL	A-6	1,996	1,718	2,645	16,2
TP-09	SACO	0,40	98,7	93,8	91,9	90,0	83,9	48,3	20,3	28,0	CL	A-7-6				
TP-11	PARAFINADA	0,50	100,0	87,2	84,6	83,5	66,7	30,7	15,9	14,8	CL	A-6	1,982	1,703		16,4
TP-13	SACO	0,40	92,7	80,0	77,2	74,6	38,9	51,6	20,8	30,8	SC	A-7-6	1,929	1,612		19,7
TP-14	PARAFINADA	1,50	100,0	97,3	94,6	93,3	77,4	43,8	16,7	27,1	CL	A-6	2,036	1,763		15,5
TP-15	SACO	1,00	100,0	97,3	94,6	93,3	77,4	43,8	16,7	27,1	CL	A-7-6				
TP-17	PARAFINADA	1,50	100,0	94,0	91,9	90,2	67,3	28,7	15,3	13,4	CL	A-6	1,994	1,713		16,4
TP-19	PARAFINADA	1,50	98,0	86,1	84,0	82,8	61,3	26,3	15,8	10,5	CL	A-6	2,026	1,748	2,624	15,9
TP-21	PARAFINADA	0,60	100,0	87,3	84,4	82,9	62,7	28,9	17,5	11,4	CL	A-6				
	SACO	1,50	100,0	99,8	98,7	97,3	91,0	50,4	18,2	32,2	CH	A-7-6	1,993	1,662		19,9
TP-23	PARAFINADA	0,50	100,0	85,1	81,8	80,5	64,1	31,2	17,6	13,6	CL	A-6				
TP-24	SACO	2,80	100,0	81,5	76,6	75,1	42,6	28,9	17,5	11,4	SC	A-6				
TP-25	PARAFINADA	0,70	100,0	90,4	87,3	86,2	68,9	32,7	16,5	16,2	CL	A-6	2,021	1,561	2,666	29,5
TP-27	PARAFINADA	0,50	100,0	86,1	83,9	82,9	67,6	34,2	16,2	18,0	CL	A-6	2,014	1,726		16,7
TP-29	PARAFINADA	1,60	100,0	97,7	94,8	92,7	70,5	30,5	17,5	13,0	CL	A-6	2,038	1,749		16,5

<b>Nº datos</b>	18					18			18		12	12	4	12
<b>Máximo</b>	100,0	99,8	98,7	97,3	91,0	59,0	22,4	36,6			2,038	1,763	2,672	29,5
<b>Mínimo</b>	92,7	80,0	76,6	74,6	38,9	26,3	14,1	10,5			1,929	1,561	2,624	15,5
<b>Promedio</b>	99,4	91,9	89,1	87,4	68,1	36,4	17,3	19,2			2,005	1,702	2,652	17,9
<b>Dev. Est.</b>	1,8	6,5	6,9	6,8	13,0	10,2	2,1	8,6			0,031	0,061	0,022	3,9

Fuente: Estudio geotécnico proyecto Rubiales [24]

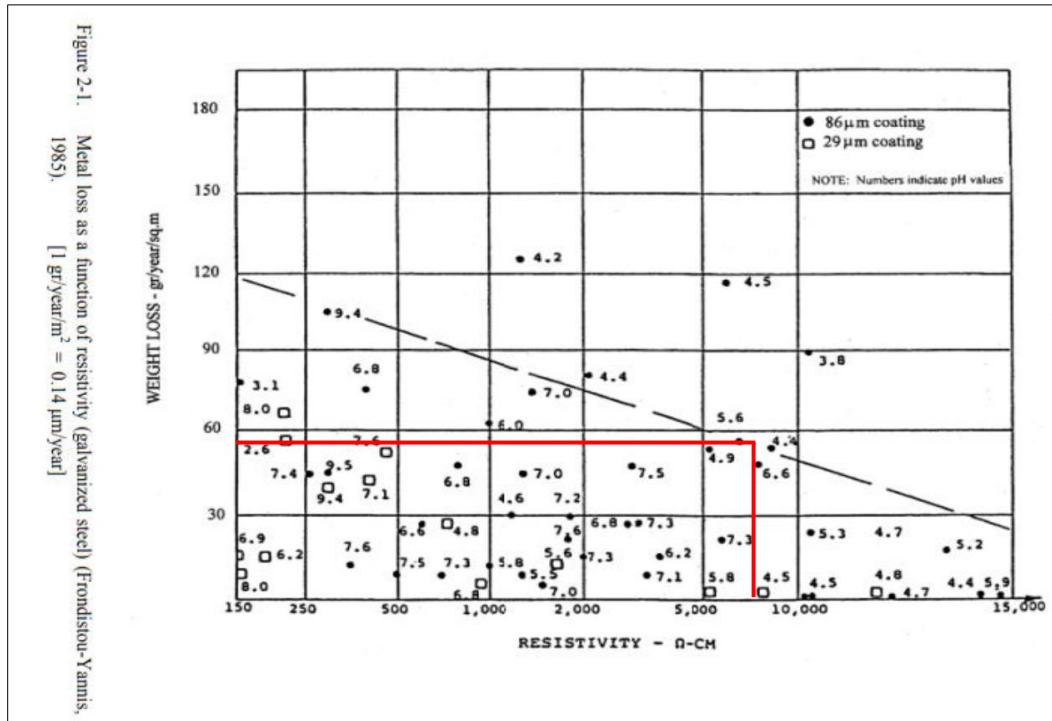
Nota: Parámetros empleados proyecto planta fotovoltaica RUBIALES

Teniendo en cuenta la información facilitada en el geotécnico, los datos introducidos en la modelización son los siguientes

Verificación mediante Modelo Romanoff-FHWA [2]

Considerando que la resistividad entre menor valor hace alusión a más corrosividad del suelo y que según el informe se presentaron resistividades entre 80 y 200 ohm.m, se realiza el análisis para la condición más desfavorable de 80 ohm.m equivalente a 8000 ohm.cm

**Figura 6.**  
*Pérdida de material en función de la resistividad-RUBIALES*



Nota: *Pérdida de material en función de la resistividad*

Indicando un valor de resistividad de 8000 Ω.cm, se obtiene un valor de 56 gr/year/sq.m

Donde,

$$56 \text{ gr/year/m}^2 * 0.14 \text{ μm/año} = 7,84 \text{ μm/año}$$

$$7,84 \text{ años} = K * 1^{0.6}$$

$$K = 7,84$$

Para una capa de galvanizado de 100 μm

$$100 \text{ μm} = 7,84 * t^{0.6}$$

$$\frac{100}{7,84} = t^{0.6}$$

$$\ln \frac{100}{7,84} = \ln t^{0.6}$$

$$\ln \frac{100}{7,84} = 0.6 \ln t$$

$$t = e^{\left(\frac{\ln\left(\frac{100}{7,84}\right)}{0.6}\right)}$$

$$t = 69,63 \text{ años}$$

Por lo anterior, de manera general y solo contando con datos de resistividad, se establece que la vida útil de la capa de galvanizado será de 69,63 años, cumpliendo con lo solicitado de 30 años.

Sin embargo, considerando que se cuenta con información más detallada de los suelos de la zona del proyecto, a continuación, se determina la estimación de la velocidad de corrosión para la capa de galvanizado en caliente y acero.

Con el fin de analizar toda la información geotécnica compartida, se analizan las demás características químicas en la zona de implantación del proyecto planta fotovoltaica RUBIALES

**Tabla 16.**

*Resultados modelo galvanizado proyecto planta fotovoltaica RUBIALES*

Soil Corrosivity (German Gas and Water Works Engineers Association).						
ITEM	EXIST	MEASURED VALUE			MARK	
Soil Composition	NO	Calcareous, marly limestone, sandy marl, not stratified sand			2	0
	NO	Loam, sandy loam (loam content 75% or less), marly loam sandy clay soil (silt 75% or less)			0	0
	SI	Clay, marly clay, humus			-2	-2
	NO	Peat, thick loam, marshy soil			-4	0
Ground water	NO	None			0	0
	NO	Exist			-1	0
	NO	Vary			-2	0
Resistivity (Ohm.cm)	SI	8000,00	>	10000	0	0
			10000	5000	-1	-1
			5000	2300	-2	0
			2300	1000	-3	0
			<	1000	-4	0
Moisture content (%)	SI	29,50%	<	20,00%	0	0
			>	20,00%	-1	-1
PH	SI	4,65	>	6	0	0
			<	6	-2	-2
Sulfide and hydrogen sulfide	NO	None			0	0
	NO	Trace			-2	0
	NO	Exist			-4	0
Carbonate	NO	0,00%	>	5%	2	0
			5%	1%	1	0
			<	1%	0	0
Chloride (mg/kg)	SI	355,00	<	100	0	0
			>	100	-1	-1
Sulphate (mg/kg)	SI	5312,00	<	200	0	0
			200	500	-1	0
			500	1000	-2	0
			>	1000	-3	-3
Cinder and coke	NO	None			0	0
		Exist			-4	0
					<b>Highly Corrosive</b>	<b>-10</b>

*Nota:* Resultados modelo galvanizado proyecto planta fotovoltaica RUBIALES

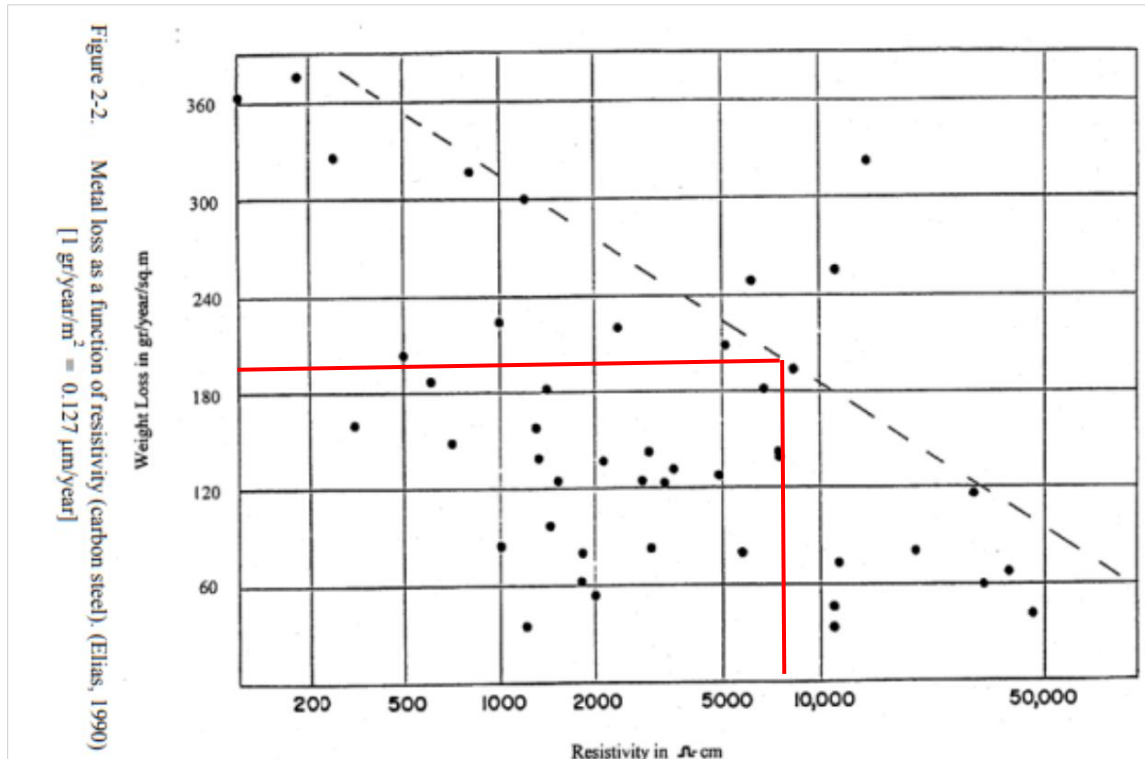
De acuerdo con el modelo usado en [2], se estima que con un valor de resistividad de 8000 ohm-cm el suelo presente en el proyecto se cataloga como levemente corrosivo, sin embargo, la existencia de sulfatos, sulfuro y cloruro también aportan o disminuyen a la estimación de la corrosión. En este caso, el suelo realmente se cataloga como altamente corrosivo.

Considerando adicionalmente de la resistividad de 8000 ohm.cm, el suelo presenta de manera general un pH de 4,6 y un recubrimiento de galvanizado de 100µm.



**Figura 8.**

*Pérdida de metal en función de la resistividad. Proyecto RUBIALES*



*Nota: Pérdida de material en función de la resistividad. Proyecto RUBIALES*

Considerando un valor de resistividad de 8000 ohm-cm, la pérdida de peso  $gr/year/m^2$  según la gráfica correspondería a un valor aproximado de 190

$$190(gr/year)/m^2 * 0.127 \mu m/año = 24,13 \mu m/año$$

Considerando una vida útil de 30 años y un desgaste de galvanizado de 100 μm en 24,13 años, el acero deberá resistir una totalidad de 5,87 años.

$$24,13 \mu m/año * 5,87 años = 141,64 \mu m = 0.141mm * 2 = 0.28mm$$

En el análisis de los pilares o estructura enterrada se ha considerado una sección reducida finalmente con un espesor de sacrificio de 300 micras (0.3mm) perimetral, es decir 0.6mm totales considerando perfiles tipo C, desde el punto de vista más desfavorable que nos aporta una mayor protección a la corrosión del terreno y los cuales cubrirían la necesidad para una vida útil total de la estructura de 30 años.

### 9.3 Análisis de resultados

Los estudios de suelos permiten identificar y clasificar el suelo según su nivel de corrosividad para así definir o realizar las recomendaciones pertinentes de protección con el fin de mitigar el riesgo de corrosión de las estructuras metálicas enterradas.

De acuerdo con los dos casos de estudios anteriormente definidos, se concluyó que con acero de sacrificio o espesor de hacer adicional es suficiente para cubrir la garantía de los proyectos de estructuras de paneles solares, los cuales oscilan entre 20-30 años. [1].

El acero de sacrificio no es la única medida tomada para la mitigación de los riesgos ante la corrosión del suelo en las estructuras metálicas, también existen consideraciones en cimentaciones alternativas como micropilotes o zapatas, estructuras de acero que cubren y protegen las estructuras enterradas.

Para la definición del tipo y las dimensiones de las cimentaciones alternativas, el estudio geotécnico igualmente juega un papel fundamental, pues es a partir de la caracterización y propiedades mecánicas de los terrenos en la zona de implantación que se definen las condiciones aptas de diseño de cimentaciones.

Es importante mencionar que en los estudios geotécnicos se destacan las limitaciones y las áreas donde pueden existir incertidumbres en la estimación de la corrosividad del suelo, lo que puede requerir investigaciones adicionales o monitoreo a largo plazo.

## 10. Conclusiones

- El medio subterráneo supone un desafío para los ingenieros que necesitan conocer el comportamiento corrosivo de un suelo sobre las estructuras metálicas enterradas en él. Su variabilidad, incertidumbre en la certeza de los datos, heterogeneidad y dependencia de las características locales lo convierten en un ambiente muy complejo
- La réplica de las condiciones naturales de un terreno es difícil de conseguir
- El tiempo de exposición de análisis experimental en sitio para la definición de la pérdida de espesor de material en estructuras metálicas enterradas dificulta la toma de decisiones de los ingenieros de diseño, obligándolos a realizar análisis predicativos e interpretación personal de los resultados
- La tasa de corrosión es mayor en los primeros años de enterramiento y luego se nivela a una tasa constante pero significativamente menor.
- Es necesario la realización de la estimación de la vida útil esperada de las estructuras con el fin de cuantificar, de manera teórica las capas de galvanizado y sobre espesor de material que deberán tener las estructuras.
- Se deben hacer muchos ensayos de resistividad, cloruros, alcalinidad, sulfuros para poder tener una dispersión de los datos y no trabajar sobre valores determinísticos
- El uso del acero en aplicaciones estructurales enterradas está en aumento, ya que los ingenieros y especificadores reconocen los beneficios de utilizar alternativas de acero bien diseñadas. Con una comprensión de los problemas de corrosión involucrados, es posible diseñar una vida aceptable para estas estructuras enterradas.
- La corrosión de estructuras metálicas en suelos es compleja y puede ocasionar problemas graves
- Se identifican los principales parámetros para la definición del nivel de corrosión como: Tipo de suelo, desechos químicos, resistividad, pH, cloruro, sulfato, sulfuro, bacterias, humedad, aireación, efectos externos.
- Aunque hay variaciones entre los diferentes métodos, la mayoría permite desarrollar una buena indicación de la amenaza de corrosión y, por lo tanto, permiten tomar decisiones de control de corrosión / evaluaciones de integridad.

## 11. Referencias

- [1] AUTO SOLAR, "VIDA UTIL PANELES SOLARES." Accessed: Mar. 31, 2024. [Online]. Available: <https://autosolar.pe/aspectos-tecnicos/vida-util-de-los-paneles-solares>
- [2] Fhwa, "CORROSION/DEGRADATION OF SOIL REINFORCEMENTS FOR MECHANICALLY STABILIZED EARTH WALLS AND REINFORCED SOIL SLOPES," 2009.
- [3] D. A. Jones, "Principles and Prevention of CORROSION Second Edition," 1996.
- [4] Editorial Etecé, "Concepto." Accessed: Aug. 22, 2023. [Online]. Available: <https://concepto.de/suelo/#:~:text=El%20suelo%20es%20la%20porci%C3%B3n%20m%C3%A1s%20superficial%20de,actividad%20biol%C3%B3gica%20que%20se%20desarrolla%20en%20la%20superficie>
- [5] M. Romanoff, *Underground Corrosion*. United States Department Of Commerce, 1957.
- [6] A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical methods : fundamentals and applications*.
- [7] R. W. Revie and H. H. Uhlig, "CORROSION AND CORROSION CONTROL An Introduction to Corrosion Science and Engineering FOURTH EDITION," 1944.
- [8] Marshall E. Parker and Edward G. Peattie, "Pipe Line Corrosion Cathodic Protection THIRD EDITION," 1984.
- [9] R. Akkouche, C. Rémazeilles, M. Jeannin, M. Barbalat, R. Sabot, and P. Refait, "Influence of soil moisture on the corrosion processes of carbon steel in artificial soil: Active area and differential aeration cells," *Electrochim Acta*, vol. 213, pp. 698–708, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.electacta.2016.07.163.
- [10] H. Najjaran, R. Sadiq, and B. Rajani, "Modeling pipe deterioration using soil properties - An application of fuzzy logic expert system," in *Proceedings of the ASCE Pipeline Division Specialty Congress - Pipeline Engineering and Construction*, pp. 749–758. doi: 10.1061/40745(146)73, 2004.
- [11] L. De Arriba-Rodriguez, J. Villanueva-Balsera, F. Ortega-Fernandez, and F. Rodriguez-Perez, "Methods to evaluate corrosion in buried steel structures: A review," *Metals*, vol. 8, no. 5. MDPI AG, May 09, doi: 10.3390/met8050334, 2018.
- [12] G. K. Burgess, I. Soils, K. H. Logan, S. P. Ewing, and C. D. Yeomans, *DEPARTMENT OF COMMERCE BUREAU OF STANDARDS OF EARLY OBSERVATIONS m sP MP*.
- [13] S. Survey Staff, "Soil Taxonomy A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service," 1999.
- [14] N. E. S. G. F. H. LP. Wilding, *Pedogenesis and soil taxonomy*, First 1983. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: ELSEVIER, 1983.

- [15] United States Department of Agriculture, "SOIL SURVEY LABORATORY METHODS MANUAL Soil Survey Investigations Report No. 42," 1996.
- [16] Dwain K. Butler, *Near-Surface Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- [17] ASTM, "G187-23 Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Two-Electrode Soil Box Method 1", doi: 10.1520/G0187-23, 2023.
- [18] P. R. Roberge, *Corrosion engineering : principles and practice*. McGraw-Hill, 2008.
- [19] S. E. Agarry, K. Salam, S. E. Agarry, and K. K. Salam, "Modelling the Kinetics of Microbiologically Influenced Corrosion of Mild Steel in Soil Environments", doi: 10.14456/tijsat.2016.29, 2016.
- [20] German standards, "din-50929-3".
- [21] ASTM, "Standard Test Method for Anions in Water by Suppressed Ion Chromatography 1," doi: 10.1520/D4327-17, 2019.
- [22] UNE Normalización Española, "UNE-EN ISO 14713-1 Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acer,". [Online]. Available: [www.aenor.es](http://www.aenor.es), 2009.
- [23] E. Cliente, D. De Energía, and S. A. E. S. P. Pacífico, "S-GC-F01 PARQUE FOTOVOLTAICO TULUA ESTUDIO DE SUELOS Y GEOTECNIA PARQUE FOTOVOLTAICO TUTLUA."
- [24] ESTEYCO Colombia, "ESTUDIO GEOTÉCNICO PSFV RUBIALES I&II, COLOMBIA," 2023.
- [25] ASTM, "D653 – 22 Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids", doi: 10.1520/D0653-22, 2022.
- [26] N. R. Council, "PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM DEVELOPMENT TRANSPORTATION RESEARCH BOARD," 1978.
- [27] P. R. Roberge, *Handbook of corrosion engineering*. McGraw-Hill, 2000.
- [28] S. Nandi and C. Vipulanandan, "Soil Electrical Resistivity as an Indicator for Soil Corrosivity." [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [29] K. Sing Lim, N. Yahaya, S. Rabeah Othman, and S. Nor Fariza, "The Relationship between Soil Resistivity and Corrosion Growth in Tropical Region", [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/270310264>, 2013.
- [30] Hamzeh Forati Rad and Hamid Reza Mohajerani, "Soil Corrosivity Investigation via Physical and Chemical Composition." Accessed: Feb. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.materialsperformance.com/articles/cathodic-protection/2022/09/soil-corrosivity-investigation-via-physical-and-chemical-composition>, 2022.
- [31] N. Gartner, T. Kosec, and A. Legat, "Monitoring the corrosion of steel in concrete exposed to a marine environment," *Materials*, vol. 13, no. 2, doi: 10.3390/ma13020407, 2020.

- [32] R. Hirata, A. Ooi, E. Tada, and A. Nishikata, "Influence of the degree of saturation on carbon steel corrosion in soil," *Corros Sci*, vol. 189, doi: 10.1016/j.corsci.2021.109568, 2021.
- [33] X. Bai *et al.*, "Corrosion behavior and mechanism of X80 steel in silty soil under the combined effect of salt and temperature," *RSC Adv*, vol. 12, no. 1, pp. 129–147, doi: 10.1039/d1ra08249c, 2021.
- [34] S. M. Abd El Haleem, S. Abd El Wanees, E. E. Abd El Aal, and A. Diab, "Environmental factors affecting the corrosion behavior of reinforcing steel II. Role of some anions in the initiation and inhibition of pitting corrosion of steel in Ca(OH)<sub>2</sub> solutions," *Corros Sci*, vol. 52, no. 2, pp. 292–302, doi: 10.1016/j.corsci.2009.09.004, 2010.
- [35] W.G. Wang and D.J. Robert, "Effect of corrosion influencing factors of cast iron pipes in clay soil," 2017.
- [36] T. Rao Kotni, S. Pandey, S. Shekhar, R. Ranjan, and P. Sarthi Srivastava, "Corrosion of different metals/alloys in soil environment: A review," *Mater Today Proc*, doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.537, 2023.
- [37] L. Xiong, P. Wang, Z. He, Q. Chen, J. Pu, and R. Zhang, "Corrosion behaviors of Q235 carbon steel under imidazoline derivatives as corrosion inhibitors: Experimental and computational investigations," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 14, no. 2, doi: 10.1016/j.arabjc.2020.102952, 2021.
- [38] P. J. Sabatini, D. G. Pass, and R. C. Bachus, "GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR NO. 4 Ground Anchors and Anchored Systems 4. Report Date 13 Type of Report and Period Covered Unclassified," 1999.
- [39] Fhwa, "Soil Nail Walls Reference Manual Developed following: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 7 th Edition," 2015.
- [40] S. Suganya and R. Jeyalakshmi, "Long term study on the corrosion behaviour of buried mild steel under different native soil environments," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, pp. 957–963. doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.152, 2021.
- [41] G. K. Burgess, I. Soils, K. H. Logan, S. P. Ewing, and C. D. Yeomans, "DEPARTMENT OF COMMERCE BUREAU OF STANDARDS OF EARLY OBSERVATIONS m sP MP," 1928.
- [42] I. S. Cole and D. Marney, "The science of pipe corrosion: A review of the literature on the corrosion of ferrous metals in soils," *Corrosion Science*, vol. 56, pp. 5–16, doi: 10.1016/j.corsci.2011.12.001, 2012.
- [43] L. Xu and Y. F. Cheng, "A finite element based model for prediction of corrosion defect growth on pipelines," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 153, pp. 70–79, doi: 10.1016/J.IJPVP.2017.05.002, 2017.
- [44] FHWA-NHI-14-007, "Soil Nail Walls Reference Manual Developed following: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 7 th Edition," 2015.

- [45] M. Wasim, S. Shoaib, N. M. Mubarak, Inamuddin, and A. M. Asiri, "Factors influencing corrosion of metal pipes in soils," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 16, no. 3. Springer Verlag, pp. 861–879, doi: 10.1007/s10311-018-0731-x, 2018.
- [46] L. De Arriba-Rodríguez, V. Rodríguez-Montequín, F. Ortega-Fernández, and J. Villanueva-Balsera, "Design of predictive models to estimate corrosion in buried steel structures," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 23, pp. 1–14, doi: 10.3390/su12239879, 2020.
- [47] P. A. Schweitzer, *Metallic materials : physical, mechanical, and corrosion properties*. M. Dekker, 2003.
- [48] J. E. Bowles, *Foundation analysis and design*. McGraw-Hill, 1996.
- [49] at3w, "[https://at3w.com/blog/que-es-la-resistividad-del-terreno-y-por-que-es-necesario-un-estudio-geoelectrico.](https://at3w.com/blog/que-es-la-resistividad-del-terreno-y-por-que-es-necesario-un-estudio-geoelectrico)"
- [50] M. Huang and J. Zhang, "Study on corrosion characteristics of grounding materials in high corrosion area," in *Journal of Physics: Conference Series*, doi: 10.1088/1742-6596/2011/1/012080, 2020.
- [51] Brierley, J. A., & Brierley, C. L, "Iron and Steel Corrosion in Soil: The Influence of Oxygen Content.", *Corrosion Science*, 2(1), pp. 53-63, 1962.
- [52] Enos, D. G., & Holbrook, J. H., "Factors Affecting Corrosion of Zinc in Soil", *Corrosion*, 21(10), pp. 329-337, 1965.
- [53] Cairns, J., & Dowson, D , "The Effect of Microbial Activity on the Corrosion of Metals", *Corrosion Science*, 11(11), pp. 863-868, 1971.
- [54] Melchers, R. E, "Predicting the Life of Steel in Soil." *Materials Performance*, 16(11), pp. 29-35, 1977.
- [55] Singh, D. D. N., & Nriagu, J. O., "Corrosion of Iron in Soils Contaminated with Petroleum Products." *Corrosion Science*, 16(5), pp. 341-346, 1976
- [56] Taylor, C. A., & Houska, C. R, "Factors Influencing the Corrosion of Zinc in Soil." *Corrosion*, 34(5), pp. 161-166, 1978.
- [57] Goodman, P, "Microbiologically Influenced Corrosion of Metals in Soil Environments." *Corrosion*, 36(11), pp. 605-608, 1980.
- [58] I.M. Robertson, "Corrosion of Buried Steel Structures", 36(1), 1980.
- [59] Revie, R. W., & Uhlig, H. H, "Sensitivity of metal corrosion to soil resistivity." *Corrosion*, 41(4), 1985.
- [60] Singh, D. D. N., & Singh, V. P., "Corrosion behaviour of iron and zinc in soils." *Corrosion Science*, 32(4), 1991.
- [61] Leidheiser Jr, H. Jr., & Burleigh, T. D, "Corrosion Protection of Steel Piling in Marine Environments". *Corrosion*, 40(8), 1984.

- [62] Shahani, D. T., & Melchers, R. E, "Corrosion Control of Underground Steel Structures", 46(1), 1990.
- [63] Melchers, R. E, "Modeling the Corrosion of Steel in Concrete." Corrosion, 54(4), 1998.
- [64] Koch, G. H., Brongers, M. P. H., Thompson, N. G., & Virmani, Y. P, "Corrosion costs and preventive strategies in the United States." FHWA-RD-01-156, 2001.
- [65] U.M. Angst, "Cement and concrete composites", 30(3-4), 1998.
- [66] A. Atrens, "Corrosion Protection of Buried Steel Structures". Materials and Corrosion, 43(8), 1992.
- [67] Osman, M. A., & Hossain, M. Z, "Corrosion Behavior of Steel Piles in Soil". Journal of Materials in Civil Engineering 11(1), 1999.
- [68] Chen, S., Ma, Z., & Cheng, Y. F, "Corrosion Behavior of Buried Steel Structures in Soil Environments". Corrosion Science 49(6), 2007.
- [69] Han, G., & Shi, B, "Corrosion of Steel Piles in Soil: Influence of Environmental Factors" 14(4), 2002.
- [70] Zhang, D., Cheng, Y. F., & Zhang, Y, "Corrosion Assessment and Prediction of Underground Pipelines" Corrosion 66(7), 2010.
- [71] Li, L., & Cheng, Y. F, "Corrosion and Protection of Steel Piles in Soil Environments". Journal of Materials in Civil Engineering 18(2), 2006.
- [72] Rahim, A. R. A., Ibrahim, M. H. I., & Mohamed, "Corrosion of Underground Pipelines: Factors and Mitigation" N. M, 2016.
- [73] Sadiq, M. A., Hamid, A. A., & Fadhil, M. J. M, "Corrosion Behavior of Steel Reinforcement in Concrete in a Marine Environment", 2017.
- [74] Zhang, D., & Cheng, Y. F, "Corrosion and Protection of Buried Steel Structures: A Review", 2011.
- [75] Shi, B., & Han, G, "Corrosion Behavior of Steel Piles in Soil", 2014.