Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MATERIALES

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN ENTRE EL AGUA POTABLE DE LA TOMILLA Y LA BEDOYA, UTILIZANDO PROBETAS DE ACERO AL CARBONO, COBRE Y ALUMINIO

Tesis Presentada por la Bachiller:
LISFANI KATIA QUICAÑA HUAYHUA
Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO DE MATERIALES

AREQUIPA-PERU
2014

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a Dios y a mis padres. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy ahora. Los amo con toda mi vida.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

AGRADECIMIENTO

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, primeramente agradecer a Dios, a mis padres y en especial al Ing. Héctor Vargas y la Ing Daisy, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua de la misma, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a la Ing. Liudmila Murillo por su colaboración para la realización de esta investigación, por su gran motivación y por ser parte del empuje al inicio de esta investigación.

A los Ingenieros de la Escuela Profesional de Ingeniería de Materiales de la Universidad Nacional de San Agustín por sus enseñanzas, orientación.

A todo aquellos muchas gracias.

,

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

ÍNDICE

Pág.

INDICE DE FIGURAS…… (
INDICE DE TABLAS…….. 8
RESUMEN…… 9
INTRODUCCION…… 11
CAPITULO 1…… 12
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN…… 12
1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA…… 12
1.2.- OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN…… 12
1.2.1. Objetivo General…….. 12
1.2.2. Objetivos Específicos…….. 12
1.3.- JUSTIFICACION DEL ESTUDIO…… 13
1.4.- HIPOTESIS…… 13
CAPITULO 2…… 14
MARCO TEORICO CONCEPTUAL…… 14
2.1.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS PROCESOS DE CORROSIÓN.. 14
2.2.- FORMAS DE LA CORROSIÓN…… 14
2.3.-CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA…… 14
2.3.1. Componentes de una celda electroquímica…… 15
2.4. TERMODINAMICA DE LA CORROCION…… 17
2.5.- CINÉTICA DE LA CORROSIÓN…… 18
2.5.1. Técnicas Electroquímicas…… 19
2.5.1. Polarización…… 19
2.5.2. Extrapolarización de Tafel…… 22
2.6.- ÍNDICES DE ESTABILIDAD DEL AGUA…… 23
2.6.1. Índice de Langelier…… 25
2.6.2. Índice de Ryznar…… 27
2.7.- INSTALACIONES DE DISTRIBUCIÓN Y QUÍMICA DEL AGUA…… 27
2.8.- PARÁMETROS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA…….. 31
2.8.1. Parámetros organolépticos…… 32
2.8.2. Parámetros Físicos…… 32
2.8.3. Parámetros Químicos…….. 33

2.9.- CORROSIÓN POR AGUA…… 40
2.10.- AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA…… 41
2.10.1. Agua Subterránea…… 41
2.10.1.1. Calidad de agua subterránea…….. 42
2.10.1.2. Ventajas y desventajas del agua subterránea…….. 43
2.10.1.3. El agua subterránea en el Perú…….. 44
2.10.2. Agua Superficial……47
2.10.3. Diferencias entre el agua subterránea y el agua superficial…….. 48
2.11.- PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE…… 48
2.11.1. Planta de Tratamiento de la Tomilla…… 48
2.11.1.1. Proceso de potabilización del agua……... 51
2.11.2. Planta de Tratamiento de La Bedoya……64
2.11.2.1. Captación de la Bedoya…….. 65
2.11.2.2. Tratamiento del agua de la Bedoya…….. 66
2.12.-METALES…… 68
CAPITULO 3…… 74
DISEÑO METODOLOGICO…… 74
3.1. METODOLOGÍA…… 74
3.1.1. Recopilación Bibliográfica…… 75
3.1.2. Determinación Variables…….. 75
3.1.3. Preparación de materiales para el ensayo electroquímico…… 76
3.1.3.1. Electrodos Utilizados……... 76
3.1.3.2. Electrolitos Utilizados…… 76
3.1.4. Equipos, materiales y reactivos utilizados…… 76
3.1.5. Realización del ensayo del método Electroquímico…… 79
3.1.6. Realización del Ensayo del Método de Tafel…….. 80
CAPITULO 4…… 81
ANÁLISIS DE RESULTADOS……..…….. 81
CONCLUSIONES…… 96
RECOMENDACIONES…… 97
BIBLIOGRAFIA…… 98
ANEXOS……..….. 99

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura. 1 Componentes de una Celda Electroquímica…… 16
Figura. 2 Sistema de tres electrodos y equipo asociado……..…… 16
Figura. 3 Diagrama de Pourbaix del Fe…… 17
Figura. 4 Representación Esquemática de las curvas de polarización anódica y catódica (La línea continua represneta los “datos experimentales”; la línea de puntos representa las extrapolaciones de las rectas Tafel respectivas)…….. 19
Figura. 5 Polarización por activación…… 20
Figura. 6 Polarización por concentración…… 21
Figura. 7 Gráfica de las Pendientes Tafel…… 22
Figura. 8 Escala del pH…….. 29
Figura. 9pH…….. 36
Figura.10 Flujo del agua Subterránea……..…… 42
Figura.11 Corte Hidrogeológico mostrando el flujo de Agua Subterránea….. 46
Figura.12 Agua Superficial…….. 47
Figura.13 Esquema planta de tratamiento de la Tomilla…… 50
Figura.14 Tableros de la planta de La Tomilla……. 51
Figura. 15 Diagrama de Flujo de la Potabilización del Agua……. 51
Figura. 16 Captación Canal Toma Tomilla…… 52
Figura. 17 Aplicación de Pre-Tratamiento…… 53
Figura. 18 Medidor Parshall…… 54
Figura. 19 Desarenador…….. 54
Figura. 20 Corte Longitudinal de un desarenador…….. 56
Figura. 21 Desarenamiento……. 57
Figura. 22 Coagulante……. 57
Figura. 23 Principio de Floculación……. 58
Figura. 24 Sedimentación…… 59
Figura. 25 Decantadores de Placas Paralelas…… 59
Figura. 26 Filtros…….. 60
Figura. 27 Batería de Cilindros de Cloro 970 Kg……. 62
Figura. 28 Cloradores…….. 62

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Figura. 29 Reservorio R16 – Paucarpata……. 63
Figura. 30 Reservorio R32 – Socabaya……..… 63
Figura. 31 Reservorio R24 – Tiabaya…… 63
Figura. 32 Reservorio R2A – Miraflores……..…. 63
Figura. 33 Producción y Distribución del Agua Potable……. 64
Figura. 34 Planta de tratamiento de agua potable La Bedoya..... 64
Figura. 35 Captación de La Bedoya…….. 66
Figura. 36 Esquema del sistema de la Bedoya…… 67
Figura. 37 Aeración tipo cascada al ingreso de la planta de San Bernardo…… 67
Figura.38 Materiales de acero utilizados en la distribución del agua…….. 69
Figura. 39 Tuberías de cobre…….. 71
Figura. 40 Tuberías de Aluminio……. 73
Figura. 41 Diagrama de Flujo del Procedimiento Experimental…… 74
Figura. 42 Potenciostato…….. 76
Figura. 43 Celda Electrolítica…….. 77
Figura.44 Voltímetro…….…… 77
Figura. 45 Calibrador……..…. 77
Figura. 46 Cronómetro……. 78
Figura. 47 Cooler…….. 78
Figura. 48 Embases de plástico……. 78
Figura. 49 Embases de vidrio……. 79
Figura. 50 Lijar…….. 79
Figura. 51 Cinta Aislante…… 79
Figura. 52 Ensayo del Método Electroquímico……. 80

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 01. Índice de Langelier Denominación……..…… 26
Tabla 02.Índice de Langelier Denominación……..……..……. 27
Tabla03. Parámetros utilizados en los índices Fisicoquímicos de calidad de aguas. 31
Tabla 04. Características clave de las cuencas de drenaje por vertiente Hidrográfica 46
Tabla 05. Características clave de las cuencas de drenaje por vertiente Hidrográfica 48
Tabla 06. Datos de los Índices de Langelier y Ryznar de la Planta de la Tomilla y la Bedoya…… 93
Tabla 07. Datos del DBO de la planta de la Tomilla y de la Bedoya……..... 94
Tabla 08. Resultados Generales……..... 95

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN ENTRE EL AGUA POTABLE DE LA TOMILLA Y LA BEDOYA, UTILIZANDO PROBETAS DE ACERO AL CARBONO, COBRE Y ALUMINIO

RESUMEN

En la actualidad la ciudad de Arequipa cuenta con dos plantas de tratamiento de agua potable, La Tomilla y el Manantial La Bedoya. La primera abastece a los distritos de Cercado, Alto Selva Alegre, Cerro Colorado, Cayma, Hunter, Mariano Melgar, Miraflores, Paucarpata, Yanahuara y José Luis Bustamante y Rivero, mediante 46 circuitos de la ciudad, a través de de 60 reservorios, mientras que la segunda abastece a las partes altas de los distritos de Mariano Melgar y Paucarpata, atendiendo 11 circuitos mediante 27 cámaras de bombeo. Siete circuitos adicionales son abastecidos por otras fuentes (Sabandía, Socabaya, Congata, Tiabaya, Sachaca y Charcani) con una capacidad de almacenamiento de 80,250 m^3 de agua, de esta forma, 64 circuitos son atendidos a través de 1,376 Km. de tuberías.

En la presente investigación se desea estudiar una comparación de la velocidad de corrosión de ambas plantas de tratamiento de agua potable, para ello se contó con la información de la caracterización del agua de ambas plantas, teniendo la cantidad de sólidos disueltos totales, alcalinidad, dureza, temperatura de cada una, y mediante el índice de Saturación Langelier (LSI), el índice de estabilidad de Ryznar (RSI), pruebas de polarización lineal y con la extrapolación de Tafel, obtendremos la velocidad de corrosión en probetas de acero al carbono 1020, cobre y aluminio.

Para obtener el Índice de Langelier (LSI) se necesitó la medida del balance entre pH y carbonato de calcio ($CaCO_3$). Cuando el valor de Langelier se haga más negativo, el agua tendrá una mayor corrosividad. Cuando el valor de Langelier se haga más positivo, el agua estará más saturada con carbonato de calcio ($CaCO_3$) teniendo la tendencia de incrustar de este compuesto el interior de la tubería. Se

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

busca un índice razonable con lo cual el contenido de sales disueltas pueda cubrir y proteger las tuberías de la corrosión.

En el caso del Índice de Estabilidad de Ryznar (RSI) me proporcionó una mejor indicación en la tendencia a la formación de incrustaciones de carbonato de calcio, relacionó el contenido de sales solubles existentes en el agua, con su grado de corrosividad en presencia de determinados factores tales como el pH y la temperatura.

También se realizaronpruebas de polarización por medio delas cuales se pudo ver el cambio del potencial de un electrodo (metal o aleación bajo prueba) conforme una corriente inducida fluya de él o hacia él. Como referencia se tiene que si el grado de polarización se incrementa, la velocidad de corrosión disminuye.

Y por último se realizó la extrapolación de Tafel que es la curva experimental que se sobrepone a la curva real de polarización, a esta curva se le denomina región Tafel y la pendiente, la pendiente Tafel. Si la línea que representa la región Tafel se extrapola para encontrarse con la horizontal trazada a partir del potencial de corrosión, esta intersección señalará sobre el eje de la abscisa del gráfico Potencial vs log de la densidad de corriente, la densidad de corriente con la cual se podré determinar la velocidad de corrosión.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

INTRODUCCION

La empresa que presta el servicio de agua potable en Arequipa Metropolitana - Sedapar s.a. es consciente de la variación que puede sufrir la calidad del agua luego de abandonar la planta de tratamiento, principalmente ocasionado por las condiciones físicas del sistema de distribución debido al tiempo de funcionamiento de la infraestructura y las condiciones de operación. Uno de los principales problemas que se presentan en las instalaciones hidráulicas es el de la corrosión en los materiales metálicos, produciéndose perforaciones y obstrucciones de las líneas de agua.

Como sabemos todas las aguas son corrosivas en cierto grado. Su tendencia corrosiva del agua dependerá de sus características químicas y físicas. También, es importante, la naturaleza del material con el cual el agua entra en contacto. Los inhibidores añadidos al agua pueden proteger un material particular, y ser perjudicial para otros. Las interacciones químicas y físicas entre los materiales de la tubería y el agua pueden causar corrosión. Los desarrollos biológicos en un sistema de distribución también originan corrosión al proveer un ambiente donde pueden ocurrir interacciones físicas y químicas. Los mecanismos reales de la corrosión en un sistema de distribución de agua son usualmente una combinación interrelacionada y compleja de los procesos biológicos, físicos y químicos. Ellos dependen en gran parte de los materiales en sí y de las propiedades químicas del agua.

Para poder establecer los programas de control y los tratamientos adecuados para controlar la corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución, es importante caracterizar cualitativa y cuantitativamente el agua; para lo cual se considera el uso de los índices: de saturación Langelier, de estabilidad de Ryznar, curvas de polarización y la extrapolación de Tafel, entre otros.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Planteamiento del problema

La infraestructura hidráulica de distribución de agua para consumo humano suele sufrir importantes problemas de incrustación o corrosión interna y/o externa. La corrosión interna provoca el deterioro de la calidad del agua debido a los productos y contaminantes que se generan, disminuye el desempeño hidráulico y aumenta los costos de distribución y de mantenimiento de la red; en casos extremos, parte de la infraestructura queda inhabilitada temporalmente y por ende, se suspende el servicio. Los fenómenos de corrosión y de incrustación, también están relacionados directamente con la velocidad del agua y el tiempo de retención hidráulico. Específicamente, la alcalinidad, pH y los residuos de desinfectantes son los principales factores que influyen en el proceso de corrosión.

1.2. Objetivos de la Investigación

1.2.1. Objetivos Generales

Determinar la velocidad de corrosión de las dos plantas de tratamiento de agua potable en Arequipa, La Tomilla y La Bedoya, y hacer una comparación de ambas cualidades de agua, mediante el índice de saturación Langelier, índice de estabilidad de Ryznar, curvas de polarización y la extrapolación de Tafel, utilizando probetas de acero al Carbono, cobre y Aluminio.

1.2.2. Objetivos Específicos

1.2.2.1. Analizar los datos de la caracterización química del aguade la planta de la Tomilla y la Bedoya, y mediante

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

estos datos obtener la velocidad de corrosión con ayuda del índice de saturación de Langelier e índice de estabilidad de Ryznar.

1.2.2.2. Mediante observación visual apreciar el estado de las probetas de acero al carbono 1020, cobre y Aluminio.

1.2.2.3. Caracterizar mediante curvas de polarización y extrapolación de Tafel, el comportamiento de la velocidad de corrosión de la planta de la Tomilla y de la Bedoya.

1.3. Justificación del Estudio

Es importante conocer los factores que afectan el deterioro físico de los sistemas de distribución de agua potable, y su influencia sobre la calidad del agua suministrada al consumidor, este estudio comparativo se realiza con el objetivo de poder controlar la corrosión en las diferentes líneas de distribución y formación de incrustaciones en las redes metálicas, a fin de reducir posibles daños

1.4. Hipótesis

Es Posible mediante la Técnica Electroquímica Potenciostatica caracterizar la agresividad corrosiva de un medio, como lo es el agua potable proveniente de diferentes recursos, utilizando para ello tres aleaciones metálicas de frecuente uso en las redes, complementada con el examen de los índices de Langelier y Ryznar, teniendo en cuenta el análisis químico correspondiente del medio.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

CAPITULO II

MARCO TEORICO CONCEPTUAL

2.1. Fundamentos Teóricos de los procesos de Corrosión

La corrosión es la degradación de un material metálico a causa de la acción del medio ambiente en el que está inmerso (atmósferas, terrenos, agua, etc.), verificándose en el proceso reacciones químicas o electroquímicas. En este estudio nuestros materiales son el acero al carbono, cobre y aluminio y el medio corrosivo es el agua de La Tomilla y el agua de La Bedoya. [1]

2.2. Formas de la Corrosión.

La corrosión ocurre en muchas y muy variadas formas, pero su clasificacióngeneralmente se basa en uno de los tres siguientes factores:

- **Naturaleza de la substancia corrosiva.** La corrosión puede ser clasificada comohúmeda o seca, para la primera se requiere un líquido o humedad mientras que para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura.
- **Mecanismo de corrosión.** Este comprende las reacciones electroquímicas o bien, las reacciones químicas.
- **Apariencia del metal corroído.** La corrosión puede ser uniforme y entonces el metalse corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, encuyo caso solamente resultan afectadas áreas pequeñas. [2]

2.3. Corrosión Electroquímica

La corrosión electroquímica ocurre cuando dos o más reacciones electroquímicas tienen lugar en la superficie de un metal.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Las reacciones electroquímicas o reacciones de oxidación-reducción pueden representarse en términos de una celda electroquímica. Las reacciones de oxidación tienen lugar en el electrodo denominado ánodo, a las reacciones de reducción ocurren en otro electrodo llamado cátodo. Así pues, los electrones viajan desde el metal (ánodo) a través de una disolución eléctricamente conductora (electrólito) hasta una zona catódica. [3]

2.3.1. Componentes de una celda electroquímica

Una celda electroquímica consta de cuatro componentes:

1. **El ánodo:** Es el electrodo sobre el que se produce la oxidación. El agente reductor pierde electrones por lo tanto se oxida.[3]

   M ———> M+ + 1e-

   Por convenio se define como el polo negativo

2. **El cátodo:** Es el electrodo sobre el que se produce la reducción. El agente oxidante gana electrones y por tanto se reduce.[3]

   M+ + 1e- ———> M

   Por convenio se define como el polo positivo.

3. **Puente Salino:** Es un tubo de vidrio relleno de un electrolito que impide la migración rápida de las sustancias de una celda a otra, permitiendo no obstante el contacto eléctrico entre ambas. El electrolito suele ser una disolución saturada de KCl retenida mediante un gel.[3]

4. **Voltímetro:** Permite el paso de los electrones cerrando el circuito. Mide la diferencia de potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo siendo la lectura el valor del voltaje de la celda.[3]

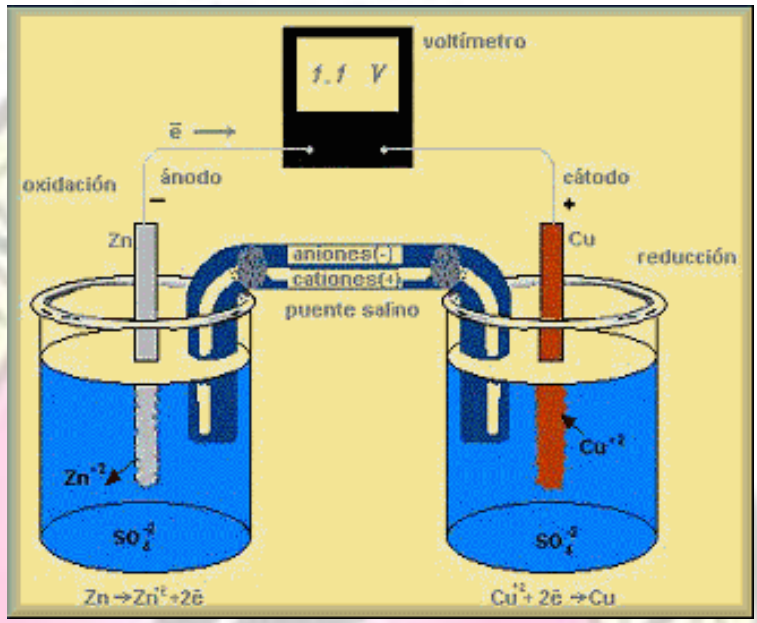


Figura 1. Componentes de una Celda Electroquímica

Sistema de tres electrodos

1. El electrodo de Trabajo (ET)
2. El electrodo de Referencia (ER): Es un electrodo que tiene un potencial fijo de electrodo conocido.
3. El contraelectrodo (CE): Se utiliza para completar el paso de la corriente

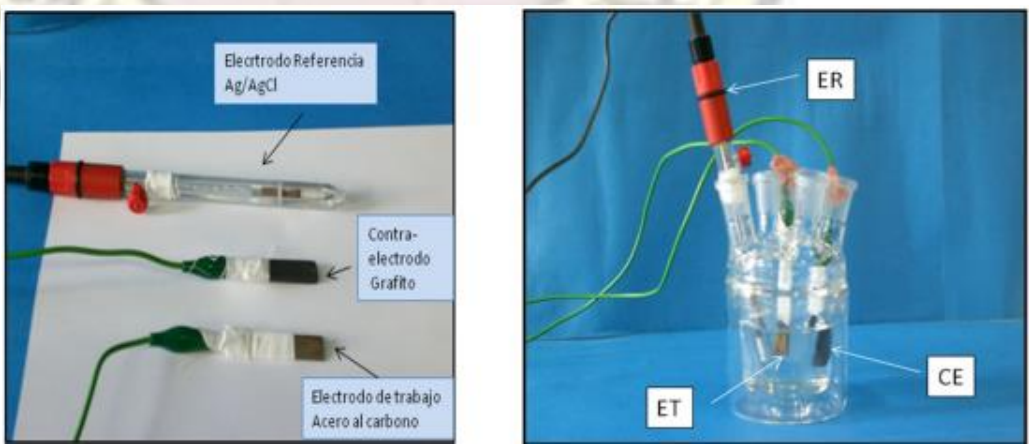


Figura 2. Sistema de tres electrodos y equipo asociado

2.4. Termodinámica de la Corrosión

Sistema de reacciones:

a. En el ánodo, la oxidación de los metales

$$m \rightarrow m^{+n} + ne^-$$

b. En el Cátodo:

$$H_2O + 1/2O_2 + e^- \rightarrow 2OH^-$$

En el caso específico del Fe (acero), la reacción electroquímica total entre el ánodo y cátodo sería:

$$Fe + H_2O + 1/2O_2 \text{ -------} \rightarrow 2OH^- + Fe^{2*}.$$

Esta reacción electroquímica se realiza con una cierta energía libre que se mide en voltios y que nos indica que la reacción a la temperatura ambiente es espontánea. Es posible examinar la posibilidad de esta reacción a otras temperaturas, pH y niveles de oxígeno a través del diagrama de Pourbaix respectivo. [4]

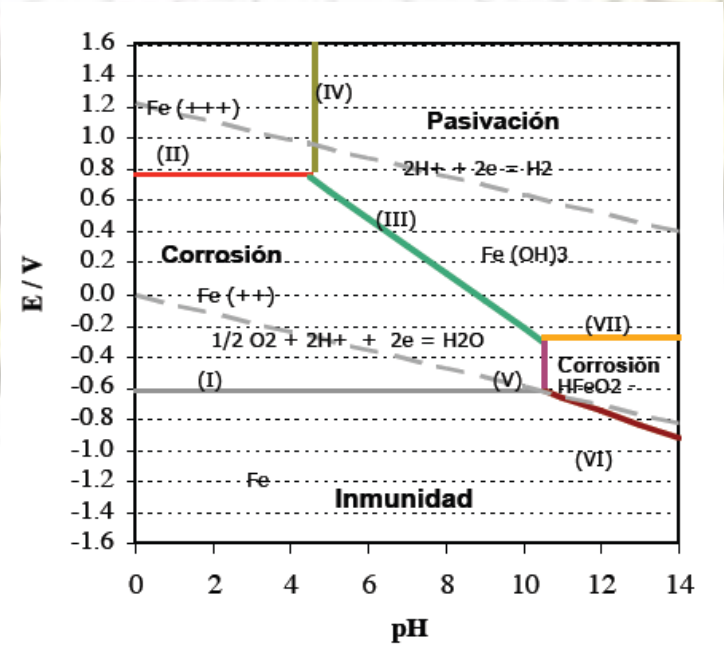


Figura 3. Diagrama de Pourbaix del Fe.

2.5. Cinética de la Corrosión

2.5.1. Velocidad de la corrosión

Ya que la corrosión es un fenómeno en que interviene una reacción anódica y una catódica, en el momento en que se produce la corrosión la velocidad de oxidación anódica ha de ser igual a la velocidad de reducción catódica. Por tanto la intersección de las curvas de polarización anódica y catódica nos dará el potencial de corrosión y la densidad de corriente de corrosión, que será proporcional a la velocidad de corrosión [2]:

$$R_{mpy} = 0.13 \frac{i_{corr} * e}{\rho}$$

Donde:

R_{mpy}: Velocidad de corrosión

i_{corr}: Densidad de corriente (microAmp. /cm^2)

e: Peso equivalente (gramos)

ρ: Densidad del metal (g/cm^3)

2.5.2. Técnicas de Electroquímicas

Las principales razones por las cuales se emplean las técnicas electroquímicas en investigación son las siguientes:

- Determinar que material es más resistente en un medio dado.
- Estudiar mecanismos de corrosión.
- Verificar si un material puede utilizarse en un medio determinado.
- Verificar que el medio cumpla especificaciones técnicas.
- Evaluación de recubrimientos orgánicos, inorgánicos, etc.
- Predecir vida útil de un material.
- Determinar la resistencia frente a la corrosión de un nuevo material.
- Estudiar modificaciones del medio.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

2.5.2.1. Polarización

Cuando la corriente fluye entre el ánodo y cátodo, los potenciales de los dos cambian. Este cambio es denominado polarización. La polarización reduce la diferencia de potencial entre las áreas anódicas y catódicas. Conforme el grado de polarización se incrementa, la velocidad de corrosión disminuye. [5]

- **Curvas de Polarización**

  Las curvas que muestran la relación entre la densidad de corrosión y el potencial se denominan curvas de polarización catódica o anódica y se representan mediante el diagrama de Evans, tal y como puede observarse en la **figura 4.** [5]

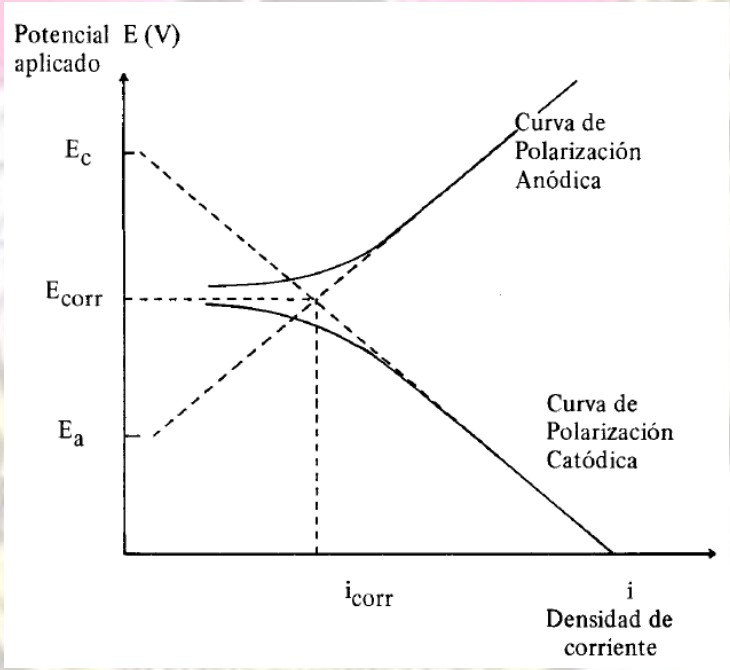


Figura 4. Representación Esquemática de las curvas de polarización anódica y catódica (La línea continua representa los "datos experimentales"; la línea de puntos representa las extrapolaciones de las rectas Tafel respectivas)

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

El potencial de corrosión y la corriente de corrosión vienen dadas por la intersección de las curvas de polarización catódica y anódica, lo que indica que ambos electrodos reaccionan a la misma velocidad durante el proceso de corrosión. Existen tres tipos de polarización:

1) **Polarización por activación**: Está relacionada con la energía de activación que se necesita para que la reacción tenga lugar en un electrodo. Para superar la energía de activación se requiere una sobretensión, para la reacción anódica o catódica. Dicha polarización puede calcularse mediante la ecuación de Tafel según:

$$\eta_A = \beta \log \frac{i}{i_0}$$

Siendo i_0 densidad de corriente de intercambio. En el caso de tener polarización catódica, $\beta < 0$. En cambio, en la polarización anódica $\beta > 0$. En la mayoría de los procesos de corrosión la contribución mayor corresponde a la polarización por activación. [5]

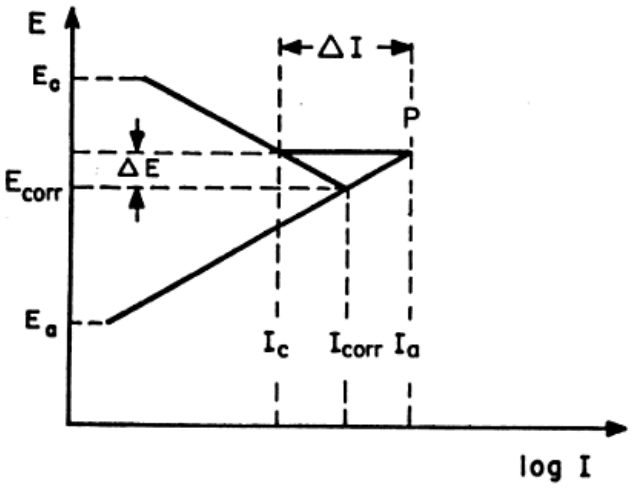


Figura 5. Polarización por Activación

2) **Polarización por resistencia:** Tiene lugar por la modificación del equilibrio por la presencia de una resistencia de valor elevado en el electrolito o el electrodo. Su valor se calcula de la forma siguiente [5]:

$$\eta_R = I * R$$

Donde

R: Es la resistencia del electrolito situado en las proximidades del electrodo

I: Es la intensidad de corriente.

3) **Polarización por concentración:** Se debe a los cambios de concentración en las proximidades del electrodo durante el proceso de difusión de los iones hacia el electrodo, creándose una zona de agotamiento. Puede calcularse mediante la siguiente expresión [5]:

$$\eta_C = \frac{RT}{nF}\, ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right)$$

Siendo

i_L : Es la densidad de corriente límite.

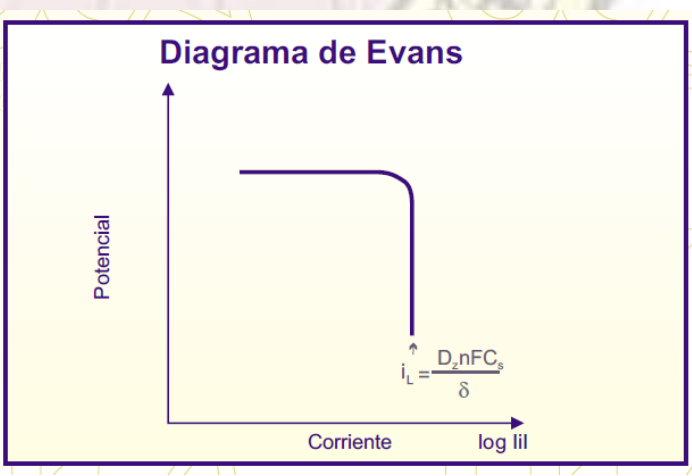


Figura. 6 Polarización por concentración

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

2.5.2.2. Extrapolación de Tafel

Las pendientes Tafel son la porción de una línea recta de una curva de polarización, la cual se traza alrededor del potencial de corrosión (Ecorr). Los resultados se muestran en una gráfica semilogarítmica en la cual sobre el eje X esta el Potencial, y sobre el eje Y se grafica el logaritmo de la corriente. Las pendientes Tafel son calculadas trazando una línea sobre la porción recta de cada uno de los lados del potencial de corrosión.

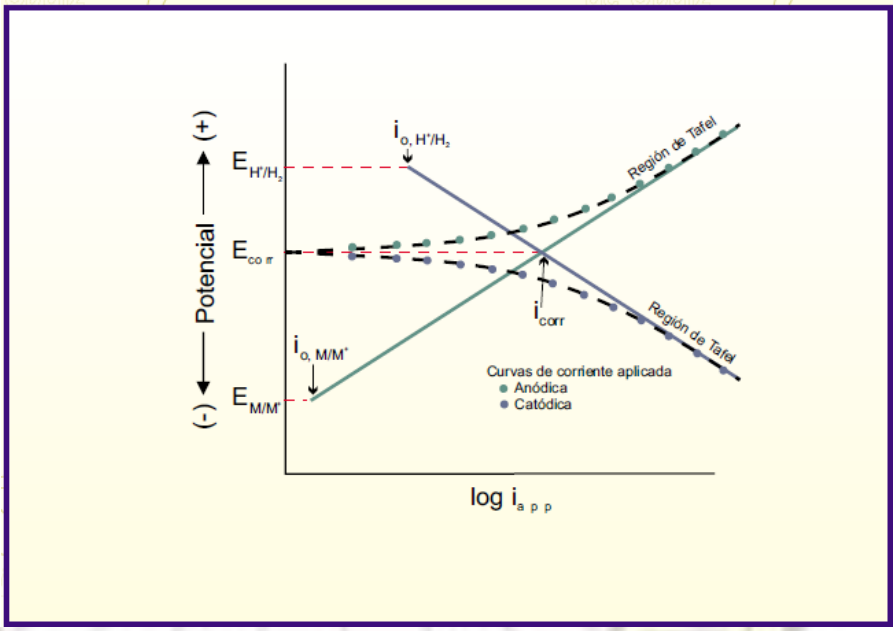


Figura 7. Gráfica de las Pendientes Tafel

El método es bastante rápido y en muchos casos exactos. Puede ser dificultoso cuando existe más de una reacción de reducción o cuando la polarización de la concentración es bastante alta. Ambas limitaciones hacen que la región Tafel sea menos distintiva, y torna dificultoso efectuar una extrapolación.

Sin embargo, estas desventajas son largamente superadas por el método de polarización lineal. Este método consiste en aplicar una corriente externa para mover el potencial de corrosión sólo

ligeramente de esa condición es decir de la condición en que la probeta se corroe libremente. [5]

2.6. Índices de Estabilidad del Agua

La capacidad del agua como disolvente es lo que le permite contener una cierta cantidad de impurezas, que posteriormente causan problemas de deposición sobre todo tipo de superficies que estén en contacto con ella. Por tanto es posible que el agua se encuentre saturada de alguna de estas impurezas (por ejemplo de carbonato cálcico) y comience a precipitar en forma de incrustaciones. Los componentes más importantes en la incrustación son los carbonatos, hierro y manganeso. Para poder controlar este efecto es necesario determinar no solo cualitativa, sino también cuantitativamente su tendencia agresiva. Existen una gran cantidad de fórmulas cualitativas para calcular los índices de saturación e incrustación, que pueden servir a su vez también para evaluar la corrosión. Sin embargo existen algunas controversias y preocupación por la correlación de estos índices, particularmente el de Langelier, con la corrosividad de las aguas por lo que algunos especialistas son muy cautelosos al utilizar los índices para la medición de la corrosividad, dejándolos en plena vigencia para medir la incrustación.

Existen también métodos que permiten determinar de manera cuantitativa la agresividad del agua, los cuales al tener un mayor sustento teórico proveen mejores resultados que los modelos cualitativos; sin embargo, debido a su complejidad y difícil aplicación, dichos modelos suelen ser poco utilizados.

Además de determinar en el agua la dureza, el oxigeno disuelto etc., es conveniente utilizar, para una determinada temperatura o intervalos de temperaturas, algunos de los varios índices que nos dan con suficiente aproximación la tendencia de depositar carbonato de calcio o a disolverlo, evaluando el estado de equilibrio del agua en relación con su carácter incrustante corrosivo. Estos índices, en algunos de ellos adaptados a

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

condiciones específicas, y cuyo valor como contribución al estudio del agua es indudable, han sido desarrollados como formulas empíricas para obtener una "tendencia" predictiva sobre su comportamiento en contacto con metales y cuya velocidad corrosión dependerá de la difusión del oxigeno disuelto en la superficie de metales como el hierro, cobre y latón, no teniendo, por consiguiente, aplicación para el agua en contacto con metales pasivos que se corroen menos cuanto más elevada es la concentración de oxigeno en su superficie, tales como el aluminio y los aceros inoxidables.

Los índices cualitativos más utilizados son el de saturación de Langelier y el índice de estabilidad de Ryznar, siguiéndoles dadas sus características, el índice de Larson y Duswell, el de corrosión de Riddck, el índice de fuerza de conducción de Mc. Cauley, y los diagramas de Calswell-Lawrence para determinar la agresividad e incrustabilidad del agua; por otra parte, el método cuantitativo de Mojmir Mach interrelaciona aspectos como la aportación de los iones denominados "ajenos" (todos los cationes y aniones presentes en el agua diferentes al calcio, bicarbonatos, carbonatos y protones) con la fuerza iónica, la disociación del agua, del acido carbónico y la ecuación de electroneutralidad. [6]

El agua corrosiva actúa sobre la conducción metálica de tres maneras diferentes:

a) Por un lado produce el debilitamiento de la pared de la conducción al eliminarse por corrosión parte del material constituyente.

b) Por otra parte, y puesto que la corrosión no se produce de una manera uniforme, por efecto de entalla en los puntos corroídos, pueden aumentar fuertemente las tensiones debidas a las cargas.

c) Finalmente, y por la misma razón que el punto anterior, se produce una rugosidad elevada que aumenta la perdida de carga y disminuye la capacidad portante de la conducción.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

A su vez, el agua incrustante produce sobre la tubería los siguientes efectos:

d) Depósito del material sobre la pared, produciendo una reducción de la sección útil e incrementando la velocidad y la pérdida de carga.
e) Aumento importante de la rugosidad, dada la irregularidad del depósito y, por consiguiente, disminución de la capacidad portante de la conducción.

2.6.1. Índice de Langelier

En el año 1930, el Dr. WilfredLangelier descubrió la fórmula durante un trabajo de investigación consistente en estudiar cómo se formaban las incrustaciones en las tuberías de distribución del agua de la pared pública, observando como esa capa de incrustación protegía a veces de la corrosión.

El resultado de las investigaciones se concretó en una fórmula que mediante un índice establece el estado de corrosividad-incrustación del agua. Es una medida del grado de saturación del carbonato de calcio en el agua, el cual se basa en el pH, alcalinidad y dureza. Si el índice de Langelier es positivo, el carbonato de calcio puede precipitar de una solución y formar incrustaciones.

En definitiva, Langelier desarrolló un método para predecir el pH de saturación de cualquier agua no salubre, teniendo en cuenta los equilibrios del carbonato cálcico y su solubilidad a diferentes temperaturas. Tal como se ha dicho si el índice de estabilidad de Langelier (LSI) de un agua es negativo su tendencia será a disolver carbonato cálcico. En general se interpreta como la posibilidad de que el agua sea agresiva. Si el índice de Langelier es positivo, el agua tendrá tendencia a formar incrustaciones de carbonato cálcico. Cuando más alejado esta el pH del agua del pHs de saturación, más pronunciada será la inestabilidad. Langelier consideró que este índice es solo una relación cualitativa de la agresividad del agua y

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

que su valor no ayuda para juzgar sobre su actividad real. Un valor mayor del índice de Langelier no coincide necesariamente con una mayor agresividad del agua. [6]

Para obtener el Índice de Langelier (LSI) se necesitará:

- pH
- Dureza Cálcica
- Alcalinidad total
- Total de sólidos disueltos
- Temperatura

El LSI se define así:

$$\mathbf{LSI = pH - pH_s}$$

Donde:

pH: es el valor medido del pH del Agua

pH_s: es el pH a saturación en calcita o carbonato de calcio definido como:

$$\mathbf{pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D)}$$

Donde:

$A = (\mathrm{Log}_{10}[\mathrm{STD}] - 1)/10$

$B = -13.12 \times \mathrm{Log}_{10}(°C + 273) + 34.55$

$C = \mathrm{Log}_{10}[Ca^{2+}]\text{-}0.4$

$D = \mathrm{Log}_{10}[\mathrm{Alcalinidad}]$

INDICE DE LANGELIER	DENOMINACIÓN
LSI<0	agua con tendencia a ser corrosiva
LSI=0	agua en equilibrio químico
LSI>0	agua con tendencia incrustante

Tabla 1. Índice de Langelier Denominación

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

2.6.2. Índice de Ryznar

Proporcionará una mejor indicación en la tendencia a la formación de incrustaciones de carbonato de calcio, relacionará el contenido de sales solubles existentes en el agua, con su grado de corrosividad en presencia de determinados factores tales como el pH y la temperatura. [6]

$$\mathbf{RSI = 2(pH_s) - pH}$$

INDICE DE RYZNAR	DENOMINACIÓN
4< IR ≤ 5	Muy incrustante
5< IR ≤ 6	Débilmente incrustante
6< IR ≤ 7	En equilibrio
7< IR ≤ 7,5	Agresiva
7,5 < IR ≤ 9	Fuertemente agresiva
9< IR	Muy fuertemente agresiva

Tabla 2. Índice de Ryznar denominación

2.7. Instalaciones de Distribución y química del agua

Solo me referiré a los componentes del agua más comunes que pueden afectar negativamente a las instalaciones de agua potable, dejando para otra ocasión aquellos compuestos, la mayoría de ellos tóxicos, que afortunadamente suelen ser poco frecuentes y que aparecen accidentalmente o no en concentraciones indeseables.

El agua potable de distribución, según su procedencia, contiene una serie de compuestos químicos que en la mayoría de las ocasiones varían a lo largo del año en función del régimen pluviométrico y de factores

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

climatológicos, que determinan algunas de sus características que las hacen ser agresivas, corrosivas o incrustantes. Estos compuestos químicos son incorporados al agua por disolución o arrastre, ya sea al atravesar la atmósfera (gas carbónico, oxígeno, etc.) o durante su recorrido a través de las capas del terreno (carbonatos, sulfatos, cloruros, etc.). Según las características de éste y la cantidad de gas carbónico que haya absorbido, disolverá más o menos cantidad de sales cálcicas, formando, por ejemplo bicarbonato cálcico. Al efectuar la captación de cualquier agua, el bicarbonato cálcico llegará hasta las instalaciones, donde podrá originar incrustaciones calcáreas. Estas incrustaciones se producen principalmente en los lugares donde el agua se calienta, o donde sufre agitaciones, turbulencias o variaciones bruscas de presión. Bajo estas condiciones, se libera el gas carbónico que mantiene disuelta dicha cal y por ello, ésta se precipita, formando las incrustaciones calcáreas en las conducciones de agua, así como en los aparatos a ellas conectados (griferías, calderas, calentadores, acumuladores, intercambiadores de calor, lavadoras, lavavajillas). Los valores de la dureza total del agua no son excesivamente importantes desde la óptica de su potabilidad, ya que si bien los 15º F. son aceptables para cualquier uso, 50º F son ciertamente aptos para beber pero elevados para casi cualquier utilización industrial y doméstica del agua.

Tengamos en cuenta que los materiales que, básicamente y de forma general, se utilizan en las redes de distribución y en instalaciones son el acero negro, el acero galvanizado, chapa de acero, cobre, aluminio, el latón y los plásticos. La acción del agua sobre algunos metales puede provocar problemas de corrosión e igualmente puede producir envejecimiento o degradación en los materiales de síntesis. Asimismo, el equilibrio calco-carbónico del agua proporciona a ésta propiedades agresivas o incrustantes que se reflejan en los conductos y elementos de las redes de distribución, efectos que pueden sumarse a los motivados por procesos microbianos. Tomemos, por ejemplo, el caso de los depósitos acumuladores de agua caliente sanitaria que al ser afectados

por el contenido en cloruros del agua, obligan a aconsejar, para concentraciones superiores a los 150 mg/l, la utilización de depósitos de acero inoxidable aleado con titanio. Un caso similar es el de los calentadores eléctricos en los que, además de ser fabricados con el material adecuadamente resistente a la corrosión, se hace necesario instalar un ánodo de sacrificio (a cambiar periódicamente) y que actúa como protector**.**

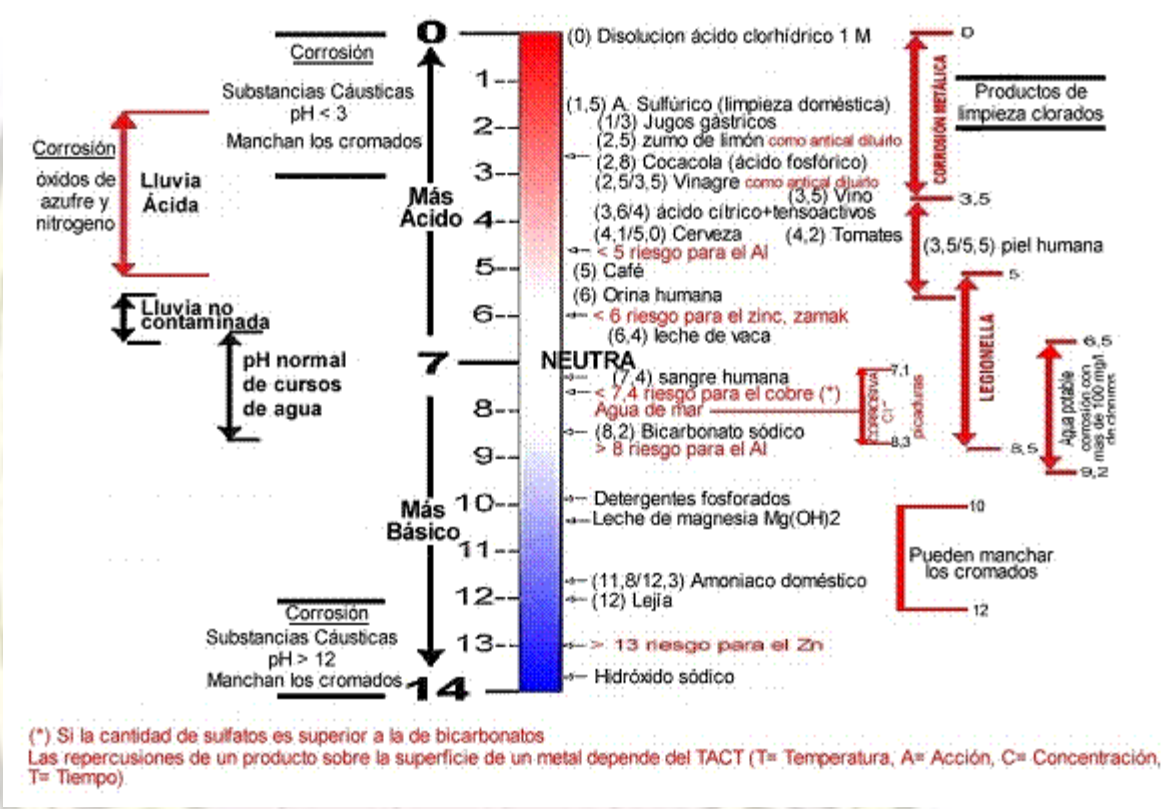


Figura 8. Escala de pH

La corrosión será todavía más acusada si a una dureza relativamente baja se une una mineralización alta, sobre todo si esta se debe, reiterando lo ya indicado, a los Cl- que poseen, dado el pequeño tamaño de sus iones, un gran poder de penetración, elevan la conductividad iónica y actúan como despolarizadores del proceso de corrosión. Además se ha comprobado que la presencia de estos iones impide una buena cristalización de las capas protectoras, volviéndolas porosas.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

El valor del pH por sí solo no da ninguna indicación definitiva sobre las características del agua, siendo necesario conocer, entre otros parámetros, el valor del TAC (contenido en bicarbonatos y de carbonatos si los hubiera). En efecto, la agresividad del agua está relacionada con el pH y con el contenido en bicarbonatos. Las aguas ácidas y las ligeramente alcalinas (pH menos de 9.5) atacan al hierro, pero este ataque puede quedar detenido por la formación de un film carbonatado protector que el agua deposita sobre el metal.

Otro caso es el de las piezas y accesorios fabricados de latón amarillo, aleación con cierto grado de predisposición a la corrosión por descinficación, siendo uno de los factores de riesgo de producirlo, la presencia de los ya mencionados iones cloruro, habiéndose comprobado que con contenidos del orden de 80 mg/l. se inician ya los fenómenos de corrosión local.

Como ya he indicado uno de los aspectos del agua a considerar es su dureza (contenido en compuestos de calcio y magnesio). Si el agua es dura los carbonatos y bicarbonatos en disolución pueden provocar incrustaciones sobre la superficie rugosa de las tuberías y sobre el interior, también rugoso, de los elementos y dispositivos a ella conectados, terminando por inutilizarlos, siendo especialmente rápido este fenómeno con el agua caliente y en aquellas elementos que se utilizan sólo esporádicamente (por ejemplo en las segundas viviendas o en complejos hoteleros o deportivos con cierres estacionales). Como es sabido las aguas muy duras se consideran, aunque no siempre sea así, poco agresivas dado que pueden depositar sobre la superficie metálica películas calcáreas continuas y compactas que dificultan el ataque del metal subyacente, sin embargo esta precipitación sin excluir además la corrosión provoca, como hemos dicho, otros problemas. También hay que aclarar que no siempre las aguas duras o muy duras provocan incrustaciones. [6]

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

2.8. Parámetros de la Caracterización del Agua

Mediante estos parámetros se obtiene un valor numérico adimensional que engloba las magnitudes de ciertos parámetros individuales, cuyo número y tipo varía según el índice. Se usan para evaluar la calidad de un agua y su evolución con el tiempo y tienen como inconveniente su poca robustez debido a que simplifican mucho la calidad al definirla mediante un único valor numérico. Los parámetros más comúnmente utilizados en los índices se exponen en la siguiente tabla: [7]

Parámetros organolépticos	Color	
	Turbidez	
	Olor	
	Sabor	
Parámetros físicos	Sólidos totales (residuo seco)	Sólidos suspendidos (sedimentables y no sedimentables)
		Sólidos filtrables (coloidales y disueltos)
	Temperatura	
	Conductividad	
	Radiactividad	
Parámetros químicos	Salinidad	
	Dureza	
	pH	
	Alcalinidad	
	Acidez	
	Oxígeno disuelto	
	Materia orgánica	
	DBO (demanda biológica de oxígeno)	
	DQO (demanda química de oxígeno)	
	COT (carbono orgánico total)	
	Bionutrientes (N,P)	
	Otros compuestos	Metales pesados
		Aniones y cationes
		Sustancias indeseables
		Sustancias tóxicas
Parámetros microbiológicos	Indicadores	Coliformes (totales y fecales)
		Estreptococos fecales
		Enterococos fecales
	Ensayos específicos (salmonella, legionela...)	

Tabla 3. Parámetros utilizados en los índices Fisicoquímicos de calidad de aguas

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

2.8.1. Parámetros Organolépticos

a) **Color:** El color es una propiedad física que indirectamente describe el origen y las propiedades del agua. La coloración del agua indica la posible presencia de óxidos metálicos, como puede ser el óxido de fierro, el cual da al agua un color rojizo.

Las algas y material orgánico en degradación también imparten color al agua. Si esto ocurre, la coloración puede deberse a la presencia de algas y microorganismos en el agua de suministro. [7]

b) **Turbidez:** La provoca la presencia de sustancias en suspensión o en materia coloidal. Un agua turbia estéticamente es desagradable y es rechazada por el consumidor. La turbidez del agua es un parámetro de importancia no solo porque es una característica de pureza en el agua a consumir. También la turbidez interfiere en procesos de tratamiento de las aguas como es en la desinfección con agentes químicos o con radiación ultravioleta, disminuyendo la efectividad biocida de éstos lo cual representa un riesgo en el consumidor.[7]

c) **Olor:** Se debe generalmente a la presencia de sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas, que poseen olor en sí mismas. El olor característico de un agua séptica, se debe al desprendimiento de sulfuro de hidrogeno (H2S) que se genera a partir de la reducción de sulfatos a sulfitos por acción de microorganismos anaeróbicos. [7]

d) **Sabor:** Es una característica estética muy importante para el usuario o consumidor.[7]

2.8.2. Parámetros Físicos

a) **Sólidos Totales:** Los sólidos totales es la suma de los sólidos disueltos y en suspensión que la muestra de agua. Se obtienen evaporando el agua a 105 °C y pesando el residuo. [7]

b) **Temperatura**: La temperatura es un parámetro físico de suma importancia para los ecosistemas hidráulicos, aunque no es parte de las características de calidad del agua potable. Cuando la temperatura aumenta, disminuye la concentración de oxigeno disuelto y si las aguas son deficientes en oxigeno, esto puede ocasionar la muerte de especies acuáticas, especialmente peces. También, la contaminación térmica puede causar trastornos en ecosistemas acuáticos ya que en algunos casos el rango de temperatura de estos, es sumamente restringido.[7]

c) **Conductividad:** La conductividad es una medida indirecta de la cantidad de sales ó sólidos disueltos que tiene un agua natural. Los iones en solución tienen cargas positivas y negativas; esta propiedad hace que la resistencia del agua al flujo de corriente eléctrica tenga ciertos valores. Si el agua tiene un número grande de iones disueltos su conductividad va a ser mayor. Cuanto mayor sea la conductividad del agua, mayor es la cantidad de sólidos o sales disueltas en ella.[7]

d) **Radioactividad:** La actividad radiológica es una medida de la emisión de partículas alfa y beta que se producen en la descomposición de materiales radioactivos. Estas emisiones son nocivas a los órganos de los seres vivos por el daño que producen estas partículas Estos son principalmente: deformaciones congénitas inducción a la formación de tumores y otros daños más a nivel celular. La actividad radiológica en el agua se debe a la presencia de materiales radioactivos en el yacimiento donde se encuentra el acuífero. Estos elementos pueden ser radio, uranio y otros elementos químicos emisores de partículas alfa y beta. [7]

2.8.3. Parámetros Químicos

a) **Salinidad:** Todas las aguas naturales contienen sales disueltas (sólidos en suspensión), y la salinidad del agua es en cierta forma

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

una de las características de calidad del agua en lo referente a su sabor y aceptabilidad por el usuario. La alta salinidad del agua por sí sola, no es motivo de daños en la salud del consumidor pero si un inconveniente en su empleo. La alta salinidad puede manchar y dañar los accesorios de baño y de cocina, y aun las tuberías mismas de conducción del agua. La alta salinidad es desagradable para la mayoría de los consumidores y los no acostumbrados a consumir aguas de este tipo. Su consumo como agua de beber, puede causarles desordenes estomacales momentáneos a los usuarios, ya que en este tipo de aguas generalmente hay alta concentración de cloruros y de sulfatos y estos últimos causan diarrea en los consumidores no acostumbrados, pero una vez que el organismo se adapta a estos cambios el agua se puede consumir sin daños a la salud. [7]

b) Dureza: La dureza del agua se debe a la presencia de cationes como: calcio, magnesio, estroncio, bario, fierro aluminio, y otros metales que se encuentran presentes en forma de sólidos disueltos. De éstos, el calcio y el magnesio son los más abundantes, por lo que casi siempre la dureza está directamente relacionada con la concentración de éstos dos elementos.

Desde el punto de vista sanitario, la dureza del agua no tiene ninguna relación con la salud, por lo que es irrelevante consumir agua de alta o baja dureza, sin embargo, el exceso de dureza hacen el agua desagradable para su empleo en servicios y en la industria.

Si la cantidad de calcio y magnesio es muy alta, cuando el agua se evapora o cuando cambian sus condiciones, se satura la solución y se forma un precipitado de carbonato de calcio y de hidróxido de magnesio que causan formación de sarro en equipos y tuberías y en algunos equipos industriales dañan éstos irreversiblemente.

Para disminuir la dureza a valores adecuados, se emplean resinas de intercambio iónico o se emplea el proceso de precipitación química de calcio y magnesio., como se describirá posteriormente.

En función del pH y de la alcalinidad, una dureza del agua por encima de 200 mg/L aproximadamente puede provocar la formación de incrustaciones, sobre todo en las calefacciones. Las aguas blandas con una dureza menor que 100 mg/L aproximadamente tienen una capacidad de amortiguación baja y pueden ser más corrosivas para las tuberías. Varios estudios epidemiológicos ecológicos y analíticos han demostrado la existencia de una relación inversa estadísticamente significativa entre la dureza del agua de consumo y las enfermedades cardiovasculares. Existen algunos indicios de que las aguas muy blandas pueden producir un efecto adverso en el equilibrio mineral, pero no se disponía de estudios detallados para su evaluación. [7]

- Las aguas con menos de 50 mg/L de CaCO3 se llaman blandas. Hasta 100 mg/L de CaCO3, ligeramente duras.
- Hasta 200 mg/L de CaCO3, moderadamente duras.
- A partir de 200 mg/L de CaCO3, muy duras.

c) pH: El potencial hidrogeno o pH, es un parámetro de suma importancia tanto para aguas naturales como aguas residuales. El rango de pH en el cual pueden interactuar los ecosistemas y sobrevivir las especies que lo conforman, está sumamente restringido, por lo cual si este valor es alterado, los procesos biológicos que normalmente se llevan a cabo pueden ser perturbados y/o inhibidos y las consecuencias son adversas. Por definición pH es el logaritmo inverso de la concentración de ión hidrogeno.

En aguas naturales y residuales el valor del pH define si las condiciones de esta son ácidas o básicas.

Un pH menor de 7.0 indica acidez en el agua, cuanto menor sea el valor del pH mayor es la concentración de iones hidrogeno y mayor es la acidez.

Por encima de un pH de 7.0 se tienen condiciones básicas en el agua. La concentración de iones hidrogeno es baja y se dice que el agua es alcalina.

Cuando el pH es de 7.0 se dice que el pH es neutro y el agua no tiene características ácidas ni alcalinas. En las aguas naturales y residuales el valor del pH está en el rango de 6.0 a 8.0 unidades de pH, y estos valores son los más adecuados para la actividad biológica de los ecosistemas. [7]

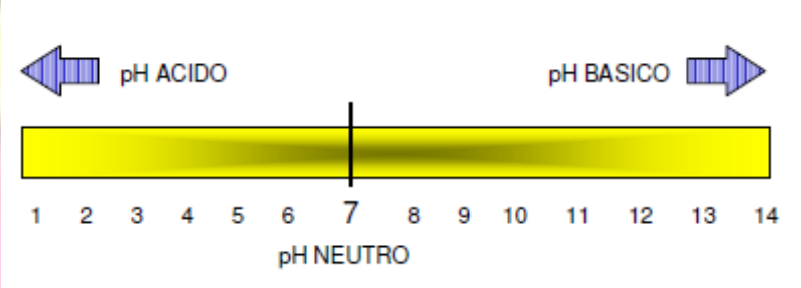


Figura 9. pH

d) Alcalinidad: La alcalinidad es un parámetro que determina la capacidad de un agua para neutralizar los efectos ácidos que sobre ella actúen. Los constituyentes principales de la alcalinidad son los bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{-2}), e hidróxidos (OH^-). La alcalinidad proviene de los minerales que se encuentran en forma de carbonatos y bicarbonatos (Na_2CO_3,$NaHCO_3$, por ejemplo), que disuelve el agua en su contacto con las capas de estratos, y también por la acción del CO_2atmosférico al disolverse en el agua. [7]

$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$(1)

Ácido Carbónico

$H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$K1=4.2 × 10^{-7} (2)

Bicarbonato

$HCO_3^- \rightarrow H^+ + CO_3^{-2}$K2=4.8 × 10^{-11} (3)

Carbonato

La alcalinidad es de primordial importancia en algunos procesos que se llevan a cabo en sistemas de tratamiento de aguas, ya que entre otras características, la presencia de alcalinidad en sus diferentes formas es necesaria para evitar los cambios bruscos de pH, y también es un componente que forma parte de las reacciones químicas en procesos tales como la coagulación y floculación o en la precipitación de calcio y magnesio para remoción de la dureza por medio del proceso cal soda/ash. Si se agrega ácido al agua, las reacciones 1, 2 y 3 anteriores se desplazan de derecha a izquierda, desprendiéndose CO_2del agua y anulando parcialmente los efectos del ácido. Si se agrega un álcali, el ión hidrógeno que se produce en las reacciones 2 y 3, reacciona para formar agua con el hidroxilo que se encuentra en el álcali agregado y también anula parcialmente los efectos alcalinos, y de esta manera la alcalinidad del agua ejerce un efecto buffer o amortiguador de cambios bruscos de pH.

e) Acidez: La acidez de un agua es su capacidad cuantitativa de reaccionar con una base fuerte a un pH determinado. El valor medido puede variar significativamente conel pH del punto final usado en la determinación. La acidez es una medida de una propiedad agregada del agua y sólo puede interpretarse en términos de substancias específicas cuando la composiciónquímica de la muestra es conocida. Los ácidos minerales, los ácidos débiles como carbónicos y acéticos, y las sales de hidrolización como hierro o sulfatos de aluminio pueden contribuir a la acidez medidasegún el método de determinación.

Los ácidos contribuyen a la corrosividad e influyen en la tasa de la reacción química, especiación química, y los procesos biológicos. La medida también refleja uncambio en la calidad del agua de la fuente. [7]

f) Demanda Bioquímica del Oxigeno (DBO): La Demanda Bioquímica de Oxigeno DBO, es una de las pruebas más

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

importantes para medir los efectos contaminantes de un agua residual, pero también es un parámetro de importancia en aguas potables. La DBO es definida como la cantidad de oxigeno requerida por las bacterias, para estabilizar la materia orgánica biodegradable, bajo condiciones aerobias. Por materia biodegradable se entiende o se interpreta como la materia orgánica que sirve como alimento a los microorganismos y que proporciona energía como resultado de su oxidación.

La DBO es ampliamente utilizada para determinar el grado de contaminación en materia orgánica biodegradable, en aguas residuales domesticas e industriales. Esta prueba es una de las más importantes en el control de contaminación en aguas, por lo que las agencias de regulación de la contaminación le dan suprema importancia. También la DBO es imprescindible al estimar y diseñar reactores y equipo para la digestión aeróbica de las aguas residuales a depurar.

Para esta prueba se mide la cantidad de oxigeno que requieren las bacterias aerobias cuando consumen la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual que se analiza. Para esto se inocula con bacterias aerobias la muestra de agua a analizar, y después de cinco días se mide la concentración de oxigeno residual.

La cantidad de oxigeno consumido se determina midiendo el oxigeno disuelto al inicio y al termino de la prueba.

Se ha tomado como tiempo de biodegradación de la muestra un tiempo de 5 días. Generalmente este es el tiempo que se requiere para que las bacterias digieran la materia orgánica biodegradable. También, debido a la baja solubilidad del oxigeno, en muestras con altos valores de DBO es necesario tomar alícuota de la muestra para asegurar que el oxigeno disuelto inicialmente, sea suficiente para la biodegradación completa. También para esta prueba se requiere que la temperatura se mantenga constante a 25°C durante los cinco días de incubación.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Para que las bacterias aerobias inoculadas, tengan condiciones favorables de crecimiento y desarrollo deben estar ausentes substancias tóxicas como: metales tóxicos, cloro, etc.; asimismo los nutrientes necesarios como: fósforo, nitrógeno, calcio, magnesio, potasio, etc. deberán encontrarse en la solución de fermentación.Las aguas naturales generalmente tienen valores muy bajos de DBO, pero es muy conveniente medir este parámetro sobre todo cuando la fuente de suministro es un agua de dudosa calidad.[7]

g) Demanda Química del Oxigeno (DQO): Este otro tipo de prueba consiste en determinar la cantidad total de materia orgánica, en términos de la cantidad de oxigeno que se requiere para oxidar ésta a dióxido de carbono y agua.

Para esto se efectúa la oxidación de dicha materia orgánica utilizando agentes fuertemente oxidantes en un medio ácido.

Debido a las condiciones tan drásticas empleadas en la oxidación, prácticamente toda la materia orgánica es oxidada a bióxido de carbono y agua. Substancias que no son fáciles de digerir biológicamente como por ejemplo la lignina, son oxidadas completamente como resultado de los oxidantes empleados y debido a esto los valores de Demanda Química de Oxigeno DQO son siempre mayores a la DBO, en un agua residual específica.

La forma de llevar a cabo esta prueba es tomando una alícuota de la muestra y agregándole un volumen especifico de solución de dicromato de potasio valorado. Bajo condiciones ácidas, a una temperatura de 150°C y en presencia de un catalizador la materia orgánica es completamente oxidada a bióxido de carbono y agua. Midiendo el dicromato de potasio consumido y de acuerdo a la relación estequiométrica, es posible determinar el oxigeno consumido por la muestra analizada, este oxigeno requerido es la DQO.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

La medición de DQO y DBO en una muestra de agua, está directamente relacionado con su grado de contaminación, así como con la naturaleza de la materia que compone los desechos sólidos, ya que a través de esta prueba es posible estimar que proporción del total de la materia orgánica es biodegradable. Esto es de gran importancia en el proceso de digestión aeróbica, puesto que de antemano se conoce cuál es el mínimo residual de materia orgánica en un agua de desecho.

Al igual que la DBO, la DQO en aguas potables debe ser sumamente baja y es un parámetro a determinar cuando la calidad del agua es incierta. [7]

h) **Compuestos Orgánicos Refractarios:** Es un indicador de la materia orgánica presente en el agua. La concentración de Carbono orgánico total en un agua superficial es generalmente inferior a 10 mg/L aunque puede ser más elevada en caso de que contenga residuos de aguas industriales o municipales. En el agua de consumo humano, un valor elevado puede indicar un incorrecto funcionamiento del sistema de desinfección.

Tratamiento para su retención:

- Adsorción sobre carbón activo.
- Radiación ultravioleta.
- Tecnología de membranas (ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa.

2.9. Corrosión por agua

La corrosividad del agua se debe a la presencia del oxígeno y cloro disuelto. Las variables más importantes que afectan a la corrosión por el agua son:

- Velocidad del agua
- Temperatura
- Contenido de oxígeno

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

La corrosión aumenta con el contenido de oxígeno y con la temperatura.
La corrosión del acero y del hierro se caracteriza por los siguientes factores:

- Temperatura: La velocidad de corrosión se duplica cada 30 ªC de aumento de temperatura.
- Concentración de Cloro y Oxigeno: La velocidad de corrosión es proporcional al contenido de oxigeno y cloro.
- Contenido de carbonato cálcico ($CaCO_3$): La presencia de esta sustancia reduce la velocidad de corrosión ya que la alcalinidad cálcica en el agua produce una protección sobre las paredes.
- pH del medio: La velocidad de corrosión de reduce con un pH fuertemente alcalino, mientras que con un pH fuertemente ácido avanza a gran velocidad.

2.10. Agua Superficial y Subterránea

2.10.1. Agua Subterránea

El agua subterránea se encuentra debajo del suelo entre grietas y espacios que hay en la tierra, incluyendo arena y piedras. El área donde se acumula el agua en las grietas se llama la zona saturada. La parte de arriba de esta área se le conoce como el nivel freático. El nivel freático puede encontrarse a un pie del suelo como a cientos de pies debajo de la superficie.

El agua subterránea se acumula en capas de tierra, arena y rocas conocidas como acuíferos. La velocidad a la que el agua se mueve depende del tamaño de los espacios en las capas y de la conexión entre éstos. Los acuíferos consisten típicamente de

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

gravilla, arena, arenilla y piedra caliza. Estos materiales son permeables porque tienen poros grandes que permiten que el agua fluya conmayor rapidez. [7]

Figura 10. Flujo del Agua Subterránea

2.10.1.1. Calidad de Agua Subterránea

Debido a que el agua subterránea se mueve a través de las rocas y la tierra del subsuelo, puede fácilmente disolver substancias durante este movimiento. Por dicha razón, el agua subterránea muy frecuentemente puede contener más substancias que las halladas en el agua superficial.

La contaminación del agua puede definirse como la modificación de las propiedades físicas, químicas o biológicas que restringen su uso. Las sustancias que modifican la calidad del agua de los acuíferos se dividen en:

- Sustancias presentes en la naturaleza
- Sustancias producidas por las actividades del hombre (antropogénicas).

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Dentro de las primeras se encuentran: arsénico, flúor y elementos radiactivos, entre otros; mientras que en las segundas se incluyen bacterias, virus, nitratos, orgánicos sintéticos e hidrocarburos (solventes, pesticidas, etc.) y metales pesados.

Las fuentes de contaminación se pueden originar en la superficie del terreno, por ejemplo, la agricultura; en el subsuelo por arriba del nivel freático, por ejemplo, basureros a cielo abierto; y en el subsuelo por debajo del nivel freático, como es el caso de pozos abandonados.

Los acuíferos costeros pueden contaminarse por intrusión salina y las fosas sépticas son, quizá, las fuentes de aguas residuales que más contribuyen a la contaminación del agua subterránea. [7]

2.10.1.2. Ventajas y desventajas del Agua Subterránea

a) Ventajas del agua subterránea

La ventaja que destaca más nítidamente es que el mayor porcentaje de agua dulce utilizable (aprox. el 95 %) o más se encuentra bajo la superficie del suelo, además: [7]

- Es el único recurso disponible en zonas desérticas.
- Hay menores pérdidas por evaporación.
- Hay menor exposición a la contaminación.
- Su disponibilidad es menos afectada por las variaciones climáticas.
- Su distribución es más amplia en el área.
- No hay pérdida de la capacidad de almacenamiento.
- La temperatura del agua es constante.
- Su composición química es casi constante.
- No tiene turbiedad ni color.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

- No necesita purificación, por no existir organismos patógenos.
- Hay un gran campo de estudio en nuestro país.

b) Desventajas del agua subterránea

- No es visible, por lo tanto se dificultan su estudio, cuantificación, explotación racional y manejo.
- En muchas regiones las rocas no contienen suficiente porosidad o permeabilidad para proporcionar la cantidad de agua requerida.

2.10.1.3. El agua Subterránea en el Perú

En forma paradojal, las aguas subterráneas son casi desconocidas y están prácticamente inexplotadas en el Perú. La evaluación de los recursos hidrológicos subterráneos son muy escasos, habiéndose efectuado algunos estudios en la región Costa mayoritariamente, siendo estos en: Tumbes, Alto Piura-Huanacabamba, Motupe-Olmos-La Leche, Chancay-Lambayeque, Chicama, Moche-Viru-Chao, Santa-Lacramarca, Pucallpa, Nepeña-Casma-Huarmey, Chancay-Huaral, Mala-Omas-Cañete, Chincha-Pisco, Ica, Palpa-Nazca, Acari-Yauca-Puquio y Tacna. Además se han realizado estudios de aguas subterráneas con diversos fines, algunos de estos estudios realizados por el IPEN (Instituto Peruano de Energía Nuclear) son los siguientes: [7]

- Hidrodinámica del acuífero de Lima, en donde se determinaron los tiempos de residencia de las aguas subterráneas y se delimitó las áreas de recarga provenientes de los Ríos Rímac y Chillón.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

- Origen de aguas del Túnel Graton, habiéndose determinado que parte importante de esta agua provienen de la cuenca alta del río Mantaro y que las aguas del Túnel no están conectadas con el rio Blanco.
- Determinación de los tiempos de residencia y mecanismo de recarga del acuífero de Lima – sector río Chillón.
- Estudio hidrológico del Altiplano Sur, lográndose determinar los tiempos de residencia de las aguas subterráneas y su interrelación con aguas de lagunas, ríos y lluvia de la zona, asimismo se desarrolló una primera hipótesis de la hidrodinámica de los acuíferos regionales Capillune y Maure.
- Estudio del Potencial geotérmico del Altiplano Sur, donde se determinó que las temperaturas de las aguas termales de la zona de Borateras son lo suficientemente altas para su explotación con fines energéticos.
- Estudio del origen de filtraciones de agua en túneles de conducción en la central hidroeléctrica Charcani-VI
- Estudio de velocidad y dirección de flujo de aguas subterráneas en la presa Yuracmayo.
- Determinación de pérdidas en el túnel de aducción de la Central Hidroeléctrica Charcani V.
- Estudio del origen de aguas del manantial “Morro de Arica” en Cañete.

En general, el siguiente cuadro sintetiza los datos de reservas explotables y explotación actual:

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Cuenca de drenaje	Población (%)	Disponibilidad de agua (km^3)	Disponibilidad de agua per cápita (m^3)	Consumo de agua en agricultura (%)
Pacífico	70	37,4	2027	53
Atlántico	26	1998,7	291703	32
Titicaca	4	10,1	9715	13
Total	100	2046,3	77534	98

Fuente: INEI (2007)

Tabla 4. Características clave de las cuencas de drenaje por vertiente Hidrográfica.

El agua subterránea tiene su propio ciclo hidrogeológico, así como sus mecanismos de recargas, que muchas veces pueden tardar miles de años, lo cual representa un recurso valioso y potencialmente útil, pero a la vez frágil, este recurso usado adecuadamente puede representar un gran impulso al desarrollo de las actividades económicas del país; el flujo del agua subterránea se muestra a continuación en la Fig. 11

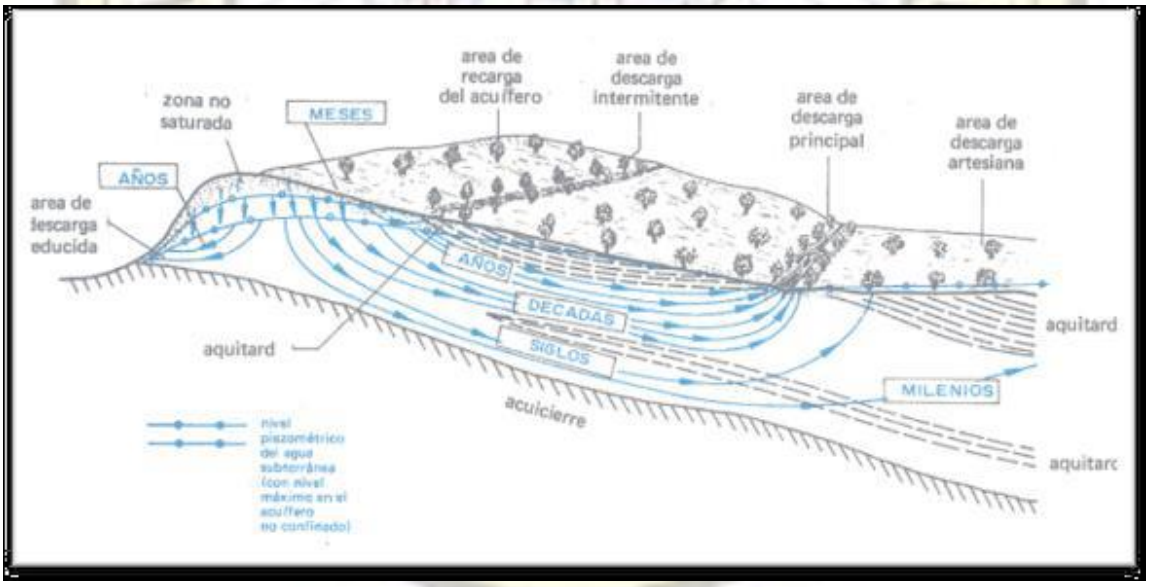


Figura 11. Corte Hidrogeológico mostrando el flujo de Agua Subterránea

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

2.10.2. Agua Superficial

El agua superficial es aquella que se encuentra circulando o en reposo sobre la superficie de la tierra. Estas masas de agua sobre la superficie de la tierra, forma ríos, lagos, lagunas, pantanos, charcas, humedales, y otros similares, sean naturales o artificiales. El agua superficial es la proveniente de las precipitaciones, que no se infiltra ni regresa a la atmósfera por evaporación o la que proviene de manantiales o nacimientos que se originan de las aguas subterráneas.

Las aguas superficiales pueden estar fluyendo constantemente como los ríos o estar en reposo como los lagos y lagunas. El escurrimiento se da sobre la tierra debido a la gravedad y a la inclinación del terreno. Así cuando el agua cae del cielo (o se precipita, por ejemplo en forma de lluvia) la que no se infiltra, escurre en la dirección de la pendiente (hacia abajo) hasta que llega a los ríos y lagos. [8]

Figura 12. Agua Superficial

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

2.10.3. Diferencias entre el agua Subterránea y el agua Superficial

Parámetro	Agua superficial	Agua subterránea
Temperatura	Varía con estación	Constante
Turbidez y sólidos suspendidos	Varía y suele ser alta	Baja o nula
Contenido mineral	Varía (suelo, lluvia...)	Constante y niveles altos
Fe, Mn y divalentes	Algo	Siempre alto
Dióxido de carbono	Poco	Siempre algo
Oxígeno disuelto	Saturación (sin contaminación)	Bajo, requiere aireación
Amonio	Sólo en agua contaminada	En aumento
Sulfuro de hidrógeno	Nada	Normalmente algo
Sílice	Niveles moderados	Ausente
Nitrato	Ausente	En aumento
Organismos vivos	Puede tener altos niveles	Normalmente nada

Tabla 5.Comparación de Calidad de Agua Superficial y Subterránea

2.11. Plantas de Tratamiento de Agua Potable

2.11.1. Planta de Tratamiento de la Tomilla

La Planta la Tomilla está ubicada en el Pueblo La Tomilla, Distrito de Cayma a 4 Km. del Centro de Arequipa y a una altura de 2,500 m.s.n.m. Su ingreso es a través de una trocha estrecha en estado regular.

La Toma fue construida en 1952 a la salida del túnel Zamácola y ha pasado por modificaciones y ampliaciones, siendo las últimas obras efectuadas entre el periodo 1986/1991, con la ejecución de la Etapa 1-A Reducida del Plan Maestro de Agua Potable y Alcantarillado de Arequipa, teniendo actualmente una capacidad nominal de conducción de 1500 l/s.

El tramo comprendido entre Charcani V y la toma recibe descargas de desagües de la Escuela de la Policía del Perú que cuenta con una población de 1,000 alumnos en promedio, su sistema de tratamiento está abandonado de modo que implica en la calidad del río Chili en un porcentaje que se mantiene aun dentro de los límites

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

permisibles de la catalogación de agua clase II, que estipula la Ley General de Aguas , estos es Demanda Bioquímica de Oxígeno 15 ppm y Número de bacterias colifecales : 5,000 ufc/100 ml

La calidad del agua en cuanto a turbidez, acusa fuertes variaciones. En los meses de Enero a Marzo, en algunos años de intensas lluvias, sube significativamente hasta más de 2000 NTU. En años normales para esta época, la turbidez alcanza a valores de 460 NTU (Feb. 1999).

En los meses de Abril a Diciembre, la turbidez varía entre un máximo de 37 NTU (Abril 1999) y un mínimo de 3 NTU (Octubre 1998). El mismo comportamiento se observa a lo largo de períodos largos correspondiente al año 2005 y 2006.

Los sedimentos de las represas tiene influencia en la calidad del agua cruda especialmente cuando son eliminados en las purgas por mantenimiento, en muchos casos se hace difícil la eliminación del olor fétido.

Las aguas que llegan a la Planta de La Tomilla, en épocas de estiaje (baja turbidez), tienen una gran cantidad de algas, se da un tratamiento algicida con solución de sulfato de cobre y pre-coloración.

El proceso de tratamiento en la Planta de la Tomilla, se lleva a cabo por medio de 03 unidades de tratamiento independientes, como se muestra en el siguiente esquema:
Actualmente se captan en promedio 1415 l/s del río Chili para abastecimiento de agua potable del canal Zamácola en el punto denominado Toma la Tomilla. [9]

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

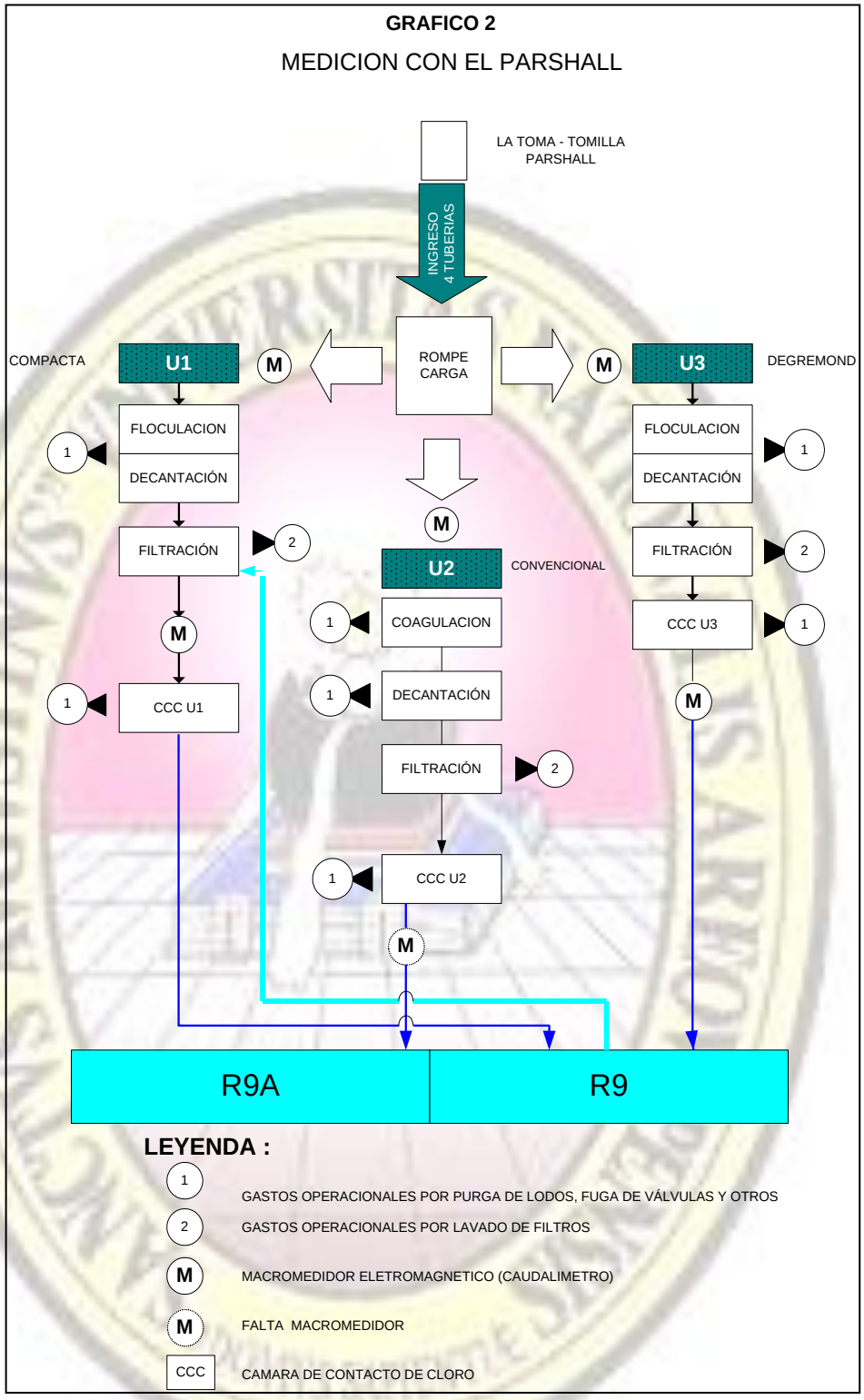


Figura 13. Esquema planta de tratamiento de la tomilla

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Figura 14.Tableros de la planta de La Tomilla

2.11.1.1. Proceso de Potabilización del Agua

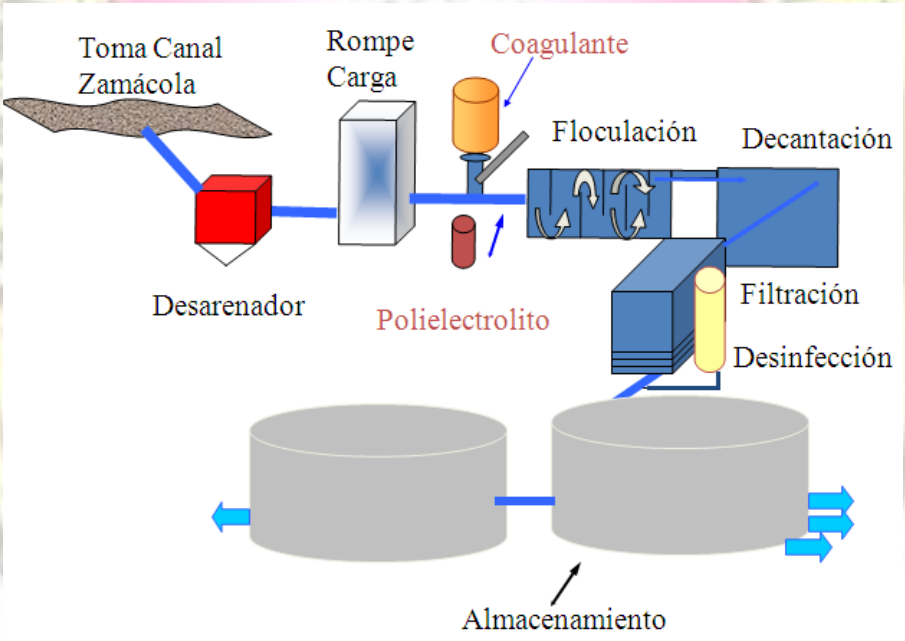


Figura 15. Diagrama de Flujo de la Potabilización del Agua

a) Captación

Consiste en captar el volumen necesariode agua proveniente del río Chili, quediscurre por el Canal Zamácola. Lossólidos gruesos (algas, basura, pajilla) seeliminan a través de una

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

rejilla y en losdesarenadores quedan las partículaspequeñas pesadas.

La rejilla de varillas verticales retiene sólidos grandes. La eliminación de basuras de la rejilla se efectúa manualmente lo que no es operativo, siendo necesaria la instalación de un sistema automático de limpieza para evitar las variaciones bruscas del caudal por represamiento.

El caudal es regulado por compuertas del tipo mural, que son operadas manualmente. La compuerta requiere una rehabilitación y mantenimiento de tal manera que permita un cierre completo, con el objetivo de cortar completamente el flujo de agua para realizar una limpieza y mantenimiento adecuado del fondo del canal, así como los trabajos de reforzamiento planteados en el presente diagnóstico. [9]

Figura 16. Captación Canal Toma Tomilla

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

b) Pre-Tratamiento

Dependiendo de las características físico, químicas y biológicas del agua cruda, se procedea la dosificación de agentes químicos:

- Cloro: Para lograr una oxidación fuerte quepermita remover el Fe y el Mn y disminuir lacarga orgánica presente.
- Sulfato de cobre: Para la eliminación de algas.
- Polímeros: Para disminuir la turbidez.

Se tiene un equipamiento para proveer de cloro gaseoso y sulfato de aluminio, actualmente se está incorporando solo cloro gaseosos y cuando el agua llega con demasiada turbidez se le aplica sulfato de aluminio.

La pre cloración se realiza con tres clorinadores al vacío. También se puede aplicar sustancias químicas para tratar la turbiedad, para esto se cuenta con los tanques para el preparado de soluciones, y se dosifica por gravedad con difusores. [9]

Figura 17. Aplicación de Pre-Tratamiento

El caudal es medido por un medidor hidráulico tipo Parshall, con una garganta de 1,20 m.

Figura 18. Medidor Parshall

- **Desaremiento**

  El desarenador cuenta 02 cámaras de decantación con un área superficial de $90\mathrm{m}^2$, cada una diseñada para un caudal de 750 l/s, para la retención de partículas pequeñas pesadas. Dichos desarenadores cuentan con zonas de aquietamiento, de sedimentación, de recolección, de evacuación y limpieza. [9]

Figura 19. Desarenador

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

El cámara desarenadora se encuentra ubicada en la toma la Tomilla aguas abajo del medidor Parshall, cuya función es remover las arenas y partículas pesadas que son trasportadas por el agua en suspensión o por arrastre.

El desarenador cuenta con zonas de aquietamiento, de sedimentación, de recolección, de evacuación y limpieza.

La cámara del sedimentación tiene un largo de 18.00 m, la sección es trapezoidal en el fondo y rectangular hacia arriba, iniciándose con un ancho de 1.00 m en la base menor y de 4.50 m en la base mayor, con una altura de 2.70m, para luego continuar con 1.40 m de altura en la sección rectangular.

El material que se decanta en el desarenador es en parte el material que se cae del techo de las bóvedas en su mayoría arenas del túnel 3 donde no está cubierto y del material que viene del Río Chili en épocas de lluvia.

Es de suponer que al ser el agua captada turbinada y con el planteamiento de cubrir el canal del túnel 3 en las zonas que no tienen ninguna protección, se evitaría el ingreso de arenas proveniente del techo de las bóvedas del túnel, y no se requeriría el desarenador, pero se tiene el inconveniente de que en épocas de lluvia si ingresan arenas provenientes de la cuenca del rio Chili y actualmente se ha encontrado arena que llega a las unidades de tratamiento en la planta la Tomilla.

Se han realizado evaluación para poder incrementar el caudal de captación, se incrementa también la cantidad de material en suspensión, en este sentido se plantea la construcción de una cámara adicional en el desarenador existente, el que se ubicara a su costado izquierdo, con lo cual se incrementara la

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

eficiencia de este componente al disminuir la velocidad horizontal.

Las dimensiones de este nuevo desarenador serán las mismas que las existentes, debiendo construirse una cámara de repartición donde actualmente está el medidor parshall.

De la Toma se conduce el agua pre tratada con cuatro tuberías de conducción de 2.5 km en promedio.

Está proyectada la posibilidad de captar hasta 4 500 l/s (3000 l/s a ser tratados en la Planta Nº 2), sirviendo como única fuente para atender la demanda futura al 2030 de Arequipa, de acuerdo a los estudios del Plan Maestro de Agua Potable y Alcantarillado de Arequipa al año 2010. [9]

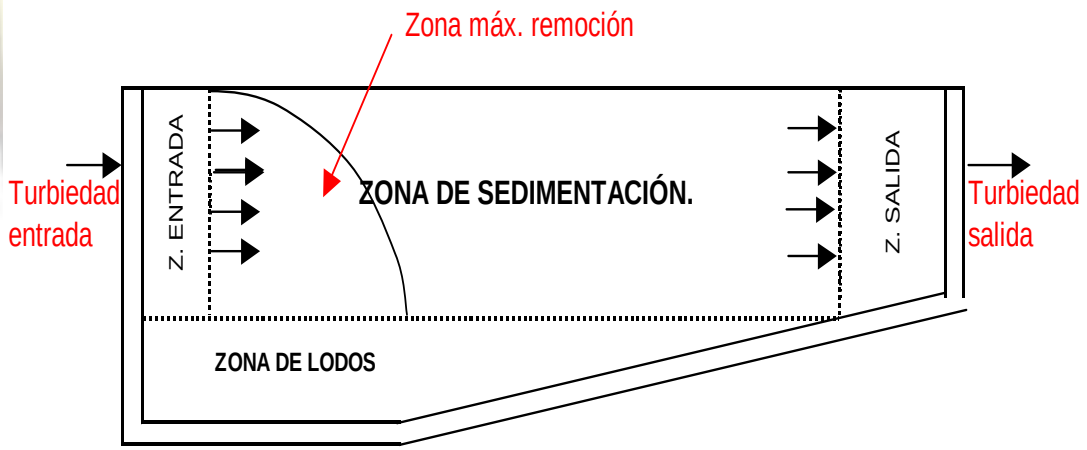


Figura 20. Corte longitudinal de un desarenador

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Figura 21. Desarenamiento

c) Coagulación

Consiste en la neutralización de las partículascon carga negativa que conforman laturbiedad y el color, mediante la adición decargas de signo positivo, a través de unproducto llamado coagulante (sulfato de aluminio, policloruro de aluminio, sulfatoférrico, cloruro férrico). [9]

Figura 22. Coagulante

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

d) Floculación

Luego de coagulada el agua, las partículas no presentan cargas en su superficie y no existen impedimentos para que se unan entre sí.

Para lograr esto, el agua se debe agitar lentamente, de modo que las partículas coaguladas, al chocar, se vayan uniendo para dar lugar a otras de mayor tamaño llamadas FLÓCS.

Este proceso debe hacerse bajo condiciones muy bien controladas, pues una agitación muy violenta en ésta etapa puede producir rotura de flóculos ya formados, en cambio una agitación muy lenta puede formar flóculos esponjosos y débiles y difíciles de sedimentar. [9]

Factores que influyen en la Floculación.

- La naturaleza del agua.
- Las Variaciones de caudal
- La intensidad de agitación
- El tiempo de floculación
- El número de compartimientos de la unidad

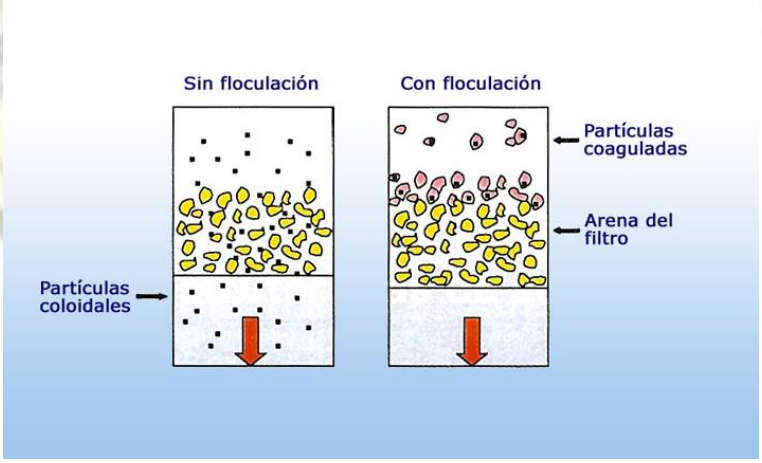


Figura 23. Principio de Floculación

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

e) Decantación y Sedimentación

La sedimentación, es la primera etapa efectiva de separación de partículas del agua, donde se logra una reducción de turbiedad y color con respecto al agua cruda.

En el sedimentador al reducirse la velocidad de circulación del agua, se produce la separación del fluído claro, que sobrenada la superficie y un lodo con una concentración elevada de materias sólidas que se depositan por efecto gravitacional y por tener peso específico mayor que el fluído. [9]

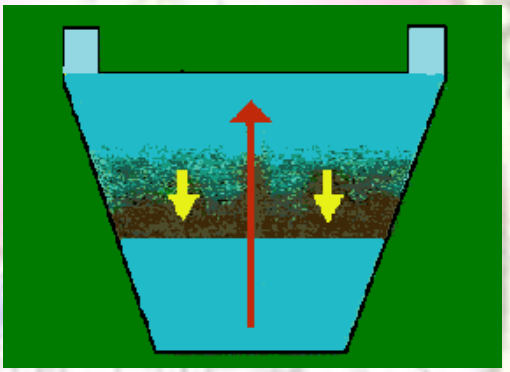


Figura 24. Sedimentación

Figura 25. Decantadores de Placas Paralelas

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

f) Filtración

Es la etapa final del proceso de clarificación del agua y la que debe dar las garantías de que el agua cumpla con las Normas de calidad de turbiedad y color.

Consiste en pasar el agua a través de un medio poroso, en la mayoría de casos formado por arena seleccionada, para lograr la remoción de sólidos coloidales y suspendidos contenidos en el agua.

En el filtro, se retienen las partículas de menor densidad (flocs pequeños) y las que por algún motivo no fueron eliminadas en el sedimentador.

Hoy en día se considera a la filtración como una de las principales barreras para la retención de microorganismos patógenos.

Los filtros al colmatarse, deben lavarse y el tiempo que transcurre entre dos lavados consecutivos de un filtro de llama Carrera de Filtración. [9]

Figura 26. Filtros

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

g) Desinfección

Al haber completado la clarificación del agua, esnecesario la adición de un desinfectante paraeliminar los microorganismos presentes. Y la desinfección tiene por finalidad destruir los microorganismos patógenos presentes en el agua: bacterias (Salmonelas, Shigellas, Vibrio Cholerae, E. Coli), protozoarios y virus.

Es necesaria porque no es posible asegurar la remoción total de los microorganismos por los procesos fisicoquímicos y biológicos usualmente utilizados en el tratamiento de agua.

El reactivoempleado es cloro líquido, existiendo otrosmétodos, como la aplicación de ozono o rayosultravioleta. La desinfección asegura la calidad delagua potable hasta el consumo humano y elcontrol se realiza mediante la medición del clorolibre residual. [9]

Entre los agentes oxidantes más usados en el sistema de producción de Agua Potable en Arequipa tenemos:

- El cloro (Cl_2) en forma líquida, envasado en cilindros a presión.
- Hipoclorito de calcio $Ca(OCl_2)$ con 70% de cloro disponible.

Aplicación de Cloro como agente de desinfección

Ventajas

- Se encuentra fácilmente disponible (gas, líquido o sólido).
- Es económico frente a otros desinfectantes.
- Es fácil de aplicar debido a su alta solubilidad (7.0 g/l a 20°C).

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

- Deja un residual en solución y protege el sistema de distribución.
- Es capaz de destruir la mayoría de los microorganismos patógenos.

Desventajas

- En algunos casos, produce sabor desagradable en el agua.
- Es corrosivo.
- Requiere de cuidadosa manipulación.

Figura 27. Batería de Cilindros de Cloro 970 Kg.

Figura 28. Cloradores

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

h) Almacenamiento y Distribución

El agua potable producida en Planta LaTomillaesalmacenada en dosreservorios de 10,000 metros cúbicoscada uno y distribuida en formacontinua al 84.9% de la población de Arequipa. [9]

Figura 29. Reservorio R16 - Paucarpata

Figura 30. Reservorio R32 – Socabaya

Figura 31. Reservorio R24 – Tiabaya

Figura 32. Reservorio R2A – Miraflores

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

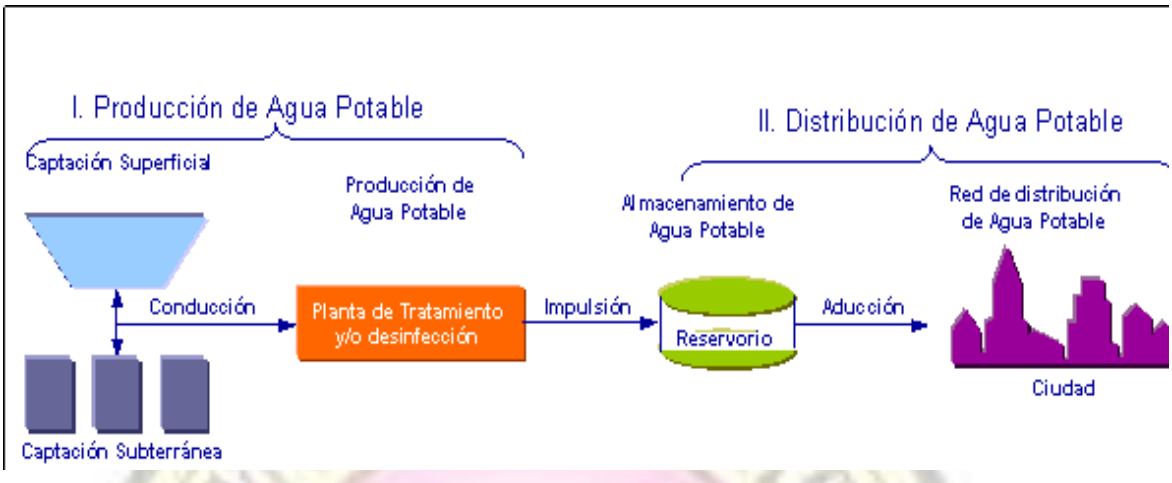


Figura 33. Producción y Distribución del Agua Potable

2.11.2. Planta de Tratamiento de La Bedoya

Ubicada al Sur – Este de Arequipa, se ubica en la cuenca del Andamayo, ladera izquierda del rio Chiguata en la zona de Tilumpaya- Chiguata. Es la toma más antigua del sistema actual de Arequipa, construida en el año de 1928 y fue reconstruida entre los años 1962/64. [9]

Figura 34. Planta de tratamiento de agua potable La Bedoya

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

La fuente es de tipo manante-artesiana, independiente del funcionamiento de la cuenca hidrológica en la que se encuentra. Esta fuente produce un caudal permanente de 201 l/s, ubicado en una zona con un acuífero definido.

El agua de esta fuente es apta para el consumo humano pero es altamente corrosiva, y el tratamiento tiene como objetivo su neutralización para proteger las tuberías. Presentan un PH < 6, con altos porcentajes de dióxido de carbono.El agua de este manantial es de buena calidad, con datos promedios de conductividad de 870 ms/cm^{-1}, turbiedad de 0.2 NTU y un pH de 7.0.

El agua de este manantial es llevada por una línea de conducción por gravedad a la Planta de San Bernardo, donde se airea para eliminar su alto contenido de CO_2y evitar que esta agua sea corrosiva.

El tratamiento: se realiza los procesos de neutralización con hidróxido de calcio o cal hidratada con una dosis de 8 mg/l y desinfección con cloro líquido con una dosis de 1.0 mg/l. En casos de emergencia se aplica hipoclorito de calcio al 65%. [9]

2.11.2.1. Captación La Bedoya

Está constituida por un reservorio de concreto de 5 m x 8 m, encima del manantial de agua, en la que se ubica una tubería 20” para rebose y una cámara de válvulas de donde parten las tuberías de conducción de agua cruda.

El agua de este manantial es llevada por una línea de conducción por gravedad que llega a la caja repartidora ubicada en la planta de San Bernardo, desde donde el caudal

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

es dividido en tres líneas de conducción y que llega a tres reservorios: R-10 (ubicado en Alto San Martín – Mariano Melgar), N-8 (ubicado en Alto Miguel Grau – Chiguata), y N-9 (ubicado en Cerrito Verde – Paucarpata). En cada uno de ellos se aplica el proceso de desinfección. Tanto en la caja repartidora como en el R-10 se airea el agua para eliminar su alto contenido de CO_2 y evitar que esta agua sea corrosiva.

Está situada en la cota 2 880 m.s.n.m. y a una distancia de 10 km de la ciudad de Arequipa. [9]

Figura 35. Captación de La Bedoya

2.11.2.2. Tratamiento del Agua de la Bedoya

El tratamiento actual consiste en aeración tipo cascada al ingreso de la planta de San Bernardo, la cual elimina el C02, además se realiza el tratamiento de neutralización para elevar el indicador de PH del agua a 7 (hidróxido de calcio), luego se

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

desinfecta con cloro liquido(junto), para ir a la caja repartidora.[9]

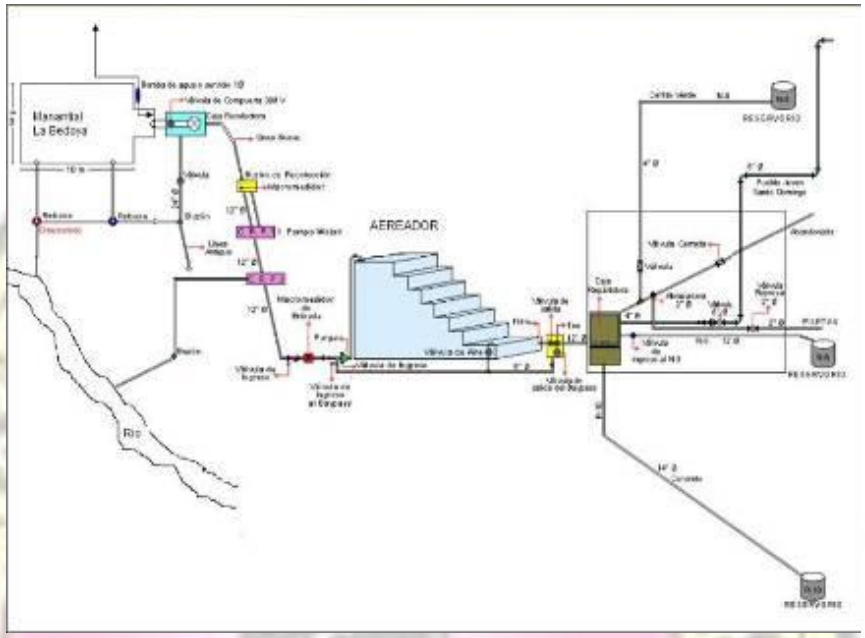


Figura 36. Esquema del sistema de la Bedoya

El tratamiento actual consiste en aeración en una unidad compuesta por 3 cascadas circulares que se encuentra en la entrada del reservorio R-10, la cual remueve un 50% del CO_2.

Figura 37.Aeración tipo cascada al ingreso de la planta de San Bernardo

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

2.12. Metales

Cada metal tiene una tendencia diferente frente a la corrosión por el ambiente circundante tal es el caso de los siguientes metales:

a) AceroAISI1020

El acero es básicamente una aleación de hierro y algunas veces con otros elementos de aleación específicos tales como el cromo, el níquel o el molibdeno que se agregan con propósitos determinados, bien para incrementar la resistencia, ductibilidad, dureza, etc.

El acero es actualmente la más importante aleación mecánica empleándose de forma intensiva en numerosas aplicaciones como bienes de equipo (maquina, herramienta, construcción, etc.) Lo malo de este tipo de materiales es que tienen una alta capacidad de corroerse si se exponen al aire y al agua.

El acero al carbono 1020 es de mayor fortaleza que el 1018 y menos fácil de conformar. Responde bien al trabajo en frío y al tratamiento térmico de cementación. La soldabilidad es adecuada. Por su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para elementos de maquinaria.

El acero es susceptible a presentar corrosión generalizada y corrosión por picado, el tipo de ataque que ocasione se encuentra relacionado a dos factores muy importantes como los son la composición de la película superficial y a su vez del medio al que se encuentre expuesto (electrolito).

Cuando un acero AISI 1020 se encuentra expuesto a un medio acuoso se pueden presentar las siguientes reacciones electroquímicas relacionadas a la corrosión de dicho acero:

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Reacción anódica o de oxidación:

$$Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^{-}$$

Las reacciones catódicas presentes pueden ser:

- Reacción de reducción del hidrogeno:

$$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$$

- Reducción del oxigeno en medio ácido:

$$O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O$$

- Reducción del oxigeno en medio básico:

$$2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$$

Con un exceso grande oxigeno se pasa a un producto de corrosión con hierro trivalente, mientras que cuando escasea el oxigeno la oxidación da lugar a productos de corrosión con mezcla de hierro divalente y trivalente del tipo $Fe_3O_4 * H_2O$.

La velocidad de corrosión es proporcional a la cantidad de oxigeno disuelto y cuando éste se gasta llega a anularse.

Figura 38. Materiales de acero utilizados en la distribución del agua

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

b) Cobre

El cobre y sus aleaciones son materiales que han sido ampliamente utilizados en sistemas de conducción de agua potable debido a su alta durabilidad y resistencia a la corrosión. Sin embargo se han informado numerosos casos de fallas.

El Cu sufre picado y corrosión generalizada. El tipo de ataque depende de la composición de la película superficial, a su vez condicionada por la composición del medio.

El cobre, aunque es un metal noble, tiene una resistencia contra la corrosión. Las fallas del cobre en la industria del agua son sucesos raros. Es importante mantener la película de óxido cuproso (cuprita) para inhibir la corrosión en los sistemas clorados de agua potable, además de mantener la velocidad y la temperatura dentro de los límites prescritos para asegurar la integridad que se espera del metal.

El cobre es el material de construcción que más se recomienda utilizar en las instalaciones hidráulicas, es un metal más resistente a la corrosión que el acero galvanizado en áreas donde predominan las aguas de menor dureza (<100 mg/l), con un contenido más alto de cloruros y sulfatos.

Las deficiencias del cobre como metal resistente a la corrosión pueden presentarse cuando hay cloro arriba de 1 mg/l y cloramina alrededor de 2 mg/l, los cuales son muy agresivos hacia el cobre, también el cobre por ser un metal más blando que el acero está sujeto a la corrosión por cavitación (erosión-corrosión), particularmente en presencia del bióxido de carbono a las temperaturas del agua caliente doméstica; para estas temperaturas se debe especificar el tamaño de los tubos lo suficientemente grande

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

para que la velocidad máxima sea menor que 4 ft/s, para el agua fría se considera calcular los tamaños con base en 8 ft/s.

A pesar de que la corrosión subterránea del cobre no suele ser un problema, hay evidencia de que tal corrosión ocurre donde los suelos son marcadamente corrosivos, por lo tanto es preciso realizar análisis de los suelos, ya que los suelos difieren en corrosividad, lo que depende de su humedad, aireación, contenido de corrosivos, drenado superficial, posibilidades para celdas termogalvánicas y corrientes parásitas.

El cobre se corroe a velocidades casi imperceptibles en aire no contaminado, agua, y ácidos no oxidantes desaireados. [10]

Figura 39. Tuberías de cobre

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

c) Aluminio

El aluminio, elemento del grupo III del sistema periódico, es un metal que reacciona con relativa facilidad. En sus combinaciones actúa como trivalente con carácter electropositivo. El calor de formación del óxido de aluminio Al_2O_3 alcanza, aproximadamente, 1590 kJ/mol. Por esta razón se utiliza el aluminio como desoxidante activo en la fabricación del acero y para procesos aluminotérmicos de reducción de metales.

El aluminio se recubre al aire libre por reacción con el oxigeno o con el vapor de agua, con una capa de oxido delgada, pero muy densa. Si se deteriora está mecánicamente o se elimina por algún tipo de decapado, surge espontáneamente una nueva capa (efecto de autocuración).

La capa de óxido consta esencialmente de Al_2O_3 amorfo. Al contrario que las capas de óxido de muchos otros metales, la capa de óxido delgada, densa y aislante del aluminio es muy adherente y proporciona así una protección segura del metal bajo ella evitando que continué la oxidación. Esta propiedad es la causante de la extraordinaria resistencia a la intemperie, así como frente a gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas.

Bajo la acción de las aguas potables conducidas o de las naturales puras en la capa de oxido natural, formada al aire, crece la capa de recubrimiento situada sobre la capa de barrera, en función de la composición del aluminio, así como de la naturaleza del agua y de la temperatura reinante, con la velocidad decreciente, hasta que alcanza un espesor final.

En las aguas agresivas, especialmente las que contienen cloruros y metales pesados, puede surgir la corrosión perforante.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

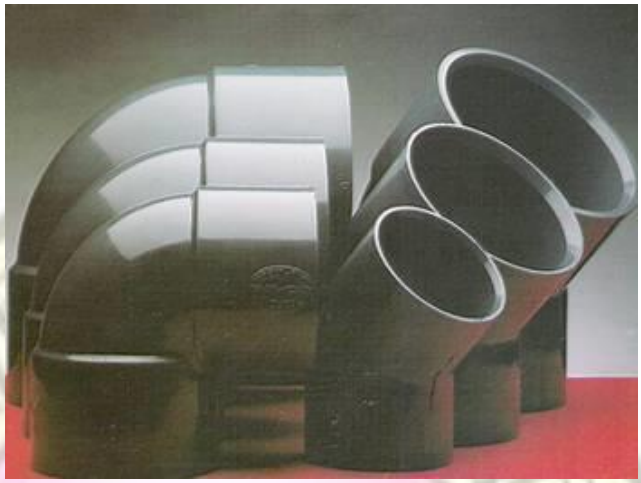


Figura 40. Tuberías de aluminio

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

CAPITULO III

DISEÑO METODOLOGICO

3.1. Metodología

Con el fin de cumplir los objetivos trazados en este proyecto se utilizó la siguiente metodología mostrada en la figura 41, la cual permitió obtener el número de ensayos requeridos para obtener resultados confiables y de esta manera llegar a una culminación satisfactoria.

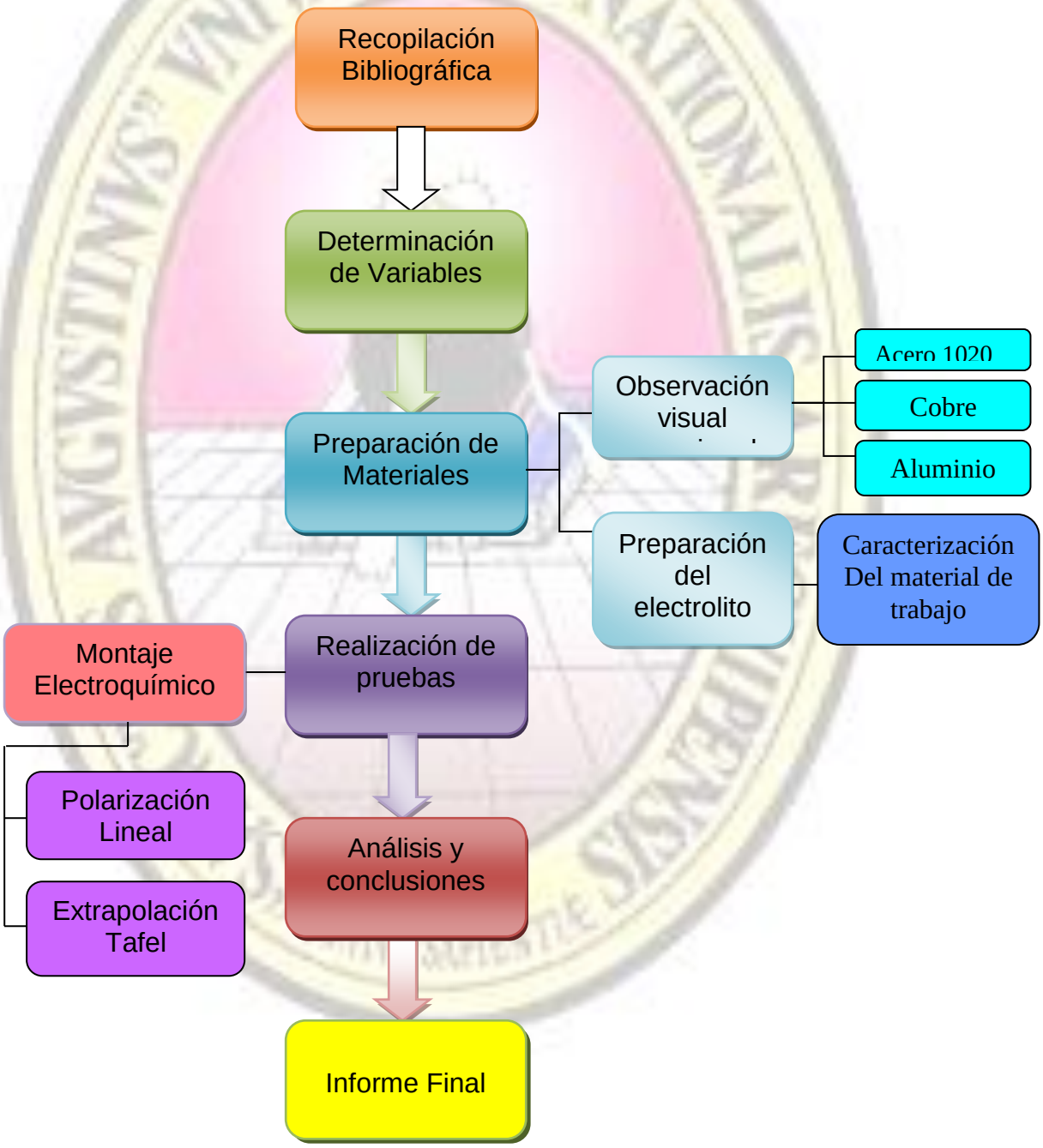


Figura 41. Diagrama de Flujo del Procedimiento Experimental

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Este proyecto se realizó tomando como material de trabajo acero AISI 1020, Cobre y Aluminio y como electrolito muestras de agua de la planta de la Tomilla y la Bedoya.

3.1.1. Recopilación Bibliográfica

Esta se llevó a cabo durante todo el periodo de la realización del proyecto, inicialmente se recopilo información de las diferentes técnicas de determinación de velocidades de corrosión (Extrapolación de Tafel, Polarización Lineal, Índice de Langelier e índice de Ryznar), así como los parámetros para la caracterización del agua. De la misma manera se estudió las diferencias en su tratamiento entre el agua Superficial (La Tomilla) y el agua Subterránea (La Bedoya). También se consulto de manera exhaustiva las Normas Técnicas de la Calidad de Agua y el Reglamento de calidad de la prestación de servicios de Saneamiento- Sedapar s.a. La revisión bibliográfica se hizo mediante una investigación en libros, trabajos de grado, normas, base de datos, páginas web, entre otros que dieron información acerca de este proyecto.

3.1.2. Determinación de Variables

Existen diferentes variables que pueden influir en el proceso de corrosión de un material, para este proyecto de investigación se manejaron las siguientes variables:

a) Constantes

- Temperatura
- Material
- Composición del agua

b) Variables

- Potencial
- Corriente

3.1.3. Preparación de Materiales para el ensayo Electroquímico

En esta parte del proyecto se utilizó como base fundamental la norma ASTM G1 (Standard Pactice for Preparing, Claning, and Evaluating Corrosion test Specimens), esta norma hace referencia a la preparación y limpieza de las probetas que se van a exponer al electrolito, así como también la limpieza de las probetas para eliminar los productos de corrosión formados en la superficie de la probeta ocasionados por la exposición.

3.1.3.1. Electrodos Utilizados

Los electrodos que se utilizaron para la realización de las pruebas electroquímicas, fueron:

a) Electrodo de referencia: electrodo de cloruro de plata
b) Electrodo Auxiliar: Electrodo de Acero Inoxidable
c) Electrodo de Trabajo
   - ❖ Acero 1020
   - ❖ Cobre
   - ❖ Aluminio

3.1.3.2. Electrolitos Utilizados

En este caso se utilizódos muestras:

- Muestra 1: Agua de la Planta de la Tomilla
- Muestra 2: Agua de la Planta de la Bedoya

3.1.4. Equipos, materiales y reactivos utilizados

a) **Potenciostato:** Usado para la medición de pruebas electroquímicas.

Figura 42. Potenciostato

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

b) **Celda Electrolítica:** Usada para la realización de pruebas electroquímicas

Figura 43. Celda Electrolítica

c) **Voltímetro:** Usada para la obtención de los datos de la corriente.

Figura 44. Voltímetro

d) **Calibrador:** Usado para las medidas de espesores y diámetros de las probetas

Figura 45. Calibrador

e) **Cronómetro:** Usado para tomar el tiempo al tomar los datos de la corriente.

Figura 46. Cronómetro

f) **Cooler:** Usado para preservar la temperatura de las muestras del agua.

Figura 47. Cooler

g) **Embases de vidrio y embases de plástico:** Usado para guardar las muestras de agua.

Figura 48. Embases de plástico

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Figura 49. Embases de vidrio

h) **Lijar:** Usado para la limpieza de las probetas.

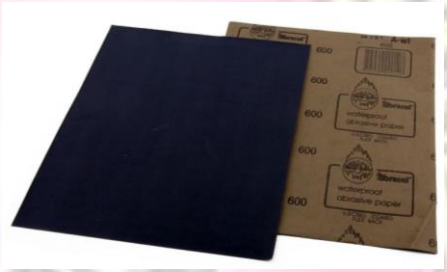


Figura 50. Lijar

i) **Cinta Aislante:** Es usado para separar el acrílico y el metal (electrodo de trabajo) esto se hace para evitar interferencias.

Figura 51. Cinta Aislantes

3.1.5. Realización del ensayo del método Electroquímico

Para la realización de la experiencia de polarización se precisa de una celda electrolítica, donde se ponen en contacto el medio agresivo que en este caso es el agua de la Bedoya y de la Tomilla, y el material metálico bajo estudio, que en este caso es el acero 1020, cobre y aluminio. Este constituye el electrodo de trabajo, cuyo potencial se mide o impone con respecto a un

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

electrodo de potencial constante, el electrodo de referencia, cerrando el circuito con el contraelectrodo o electrodo auxiliar, generalmente de material inerte.

El electrodo de trabajo se lija, se lava y se seca. Se introduce en la celda electrolítica junto con el electrodo auxiliar y el electrodo de referencia. Sé medirá el potencial a circuito abierto (Ecorr) respecto del electrodo de referencia, para seguidamente obtener las curvas de polarización.

Figura 52. Ensayo del Método Electroquímico

3.1.6. Realización del Ensayo del Método de Tafel

Las medidas obtenidas se grabarán con el fin de elaborar datos, se tendrá que realizar un ajuste lineal de los datos de acuerdo con la aproximación Tafel.

Se deberá medir siempre la superficie del área atacada en el proceso ya que se construirá una tabla I densidad de corriente (I/ Área del electrodo de trabajo) y potencial con el fin de representar log i y obtener icor y por último la velocidad de corrosión.

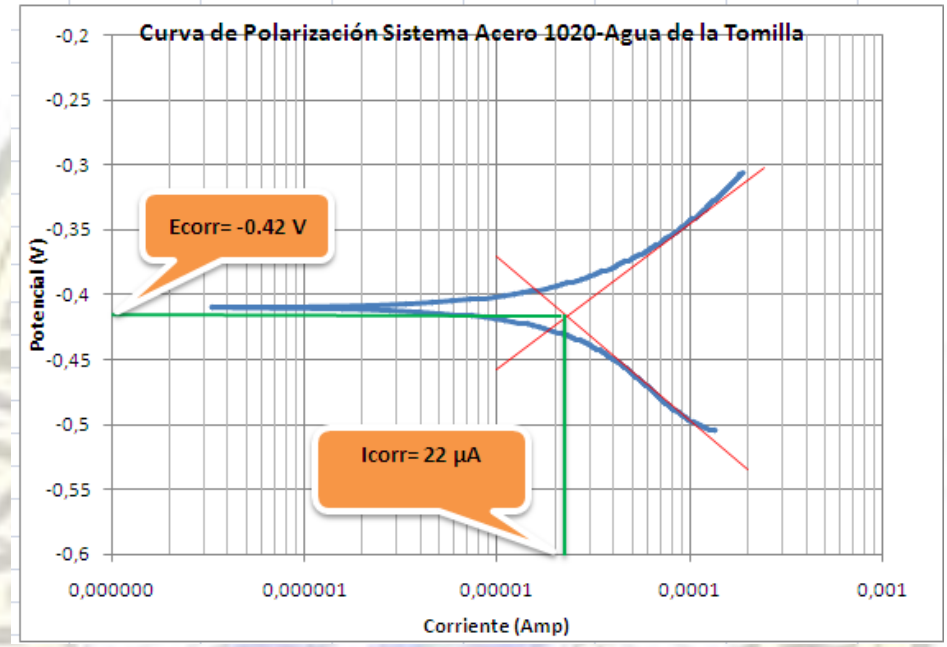
$$r = 0.13 \frac{icorr * eg}{\rho}$$

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

CAPITULO IV
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

1. MEDIANTE TECNICAS ELECTROQUIMICAS

1.1. ACERO 1020 EN AGUA DE LA TOMILLA



Gráfica 1. Curva de Polarización Sistema Acero 1020-Agua de la Tomilla

Cálculos de Datos:

- Icorr = 22 µA
- A= 5 cm^2
- $icorr = \frac{Icorr}{A} = \frac{22}{5} = 4.4 \frac{\mu A}{cm^2}$
- Ecorr= -0.42 Voltios
- Densidad del Fe= 7.86 gr/cm^3
- Peso Atómico= 55.847
- Peso Equivalente= $\frac{\text{Peso Atómico}}{\text{Número de Valencia}} = \frac{55,847}{2} = 27.9235$

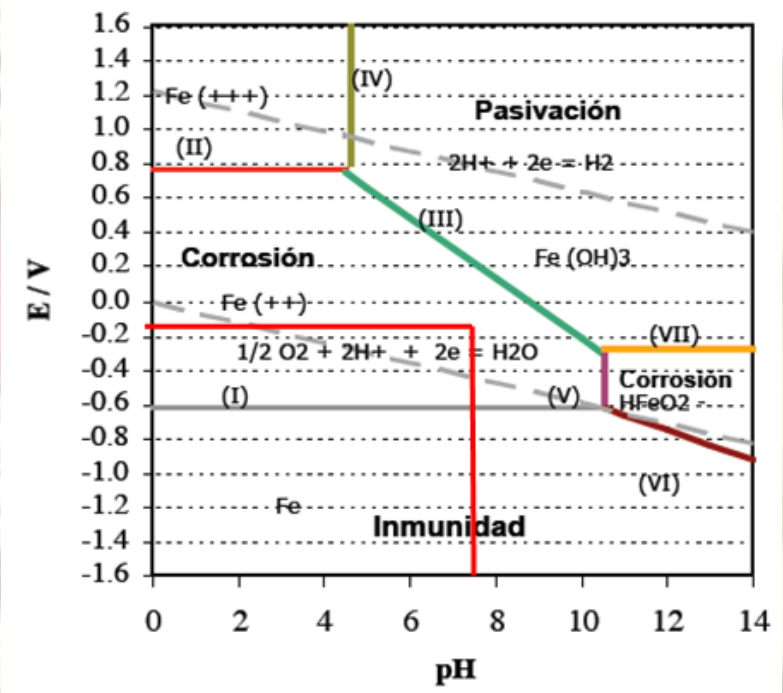
Hallamos la Velocidad de Corrosión

$$r = 0.13\frac{icorr * eg}{\rho}$$

$$r = 0.13\frac{4.44 * 27.9235}{7.86}$$

r = 2.032mils/año	**r = 51.613 Micrones/año**	**r = 0.051613 mm/año**

Diagrama de Pourbaix

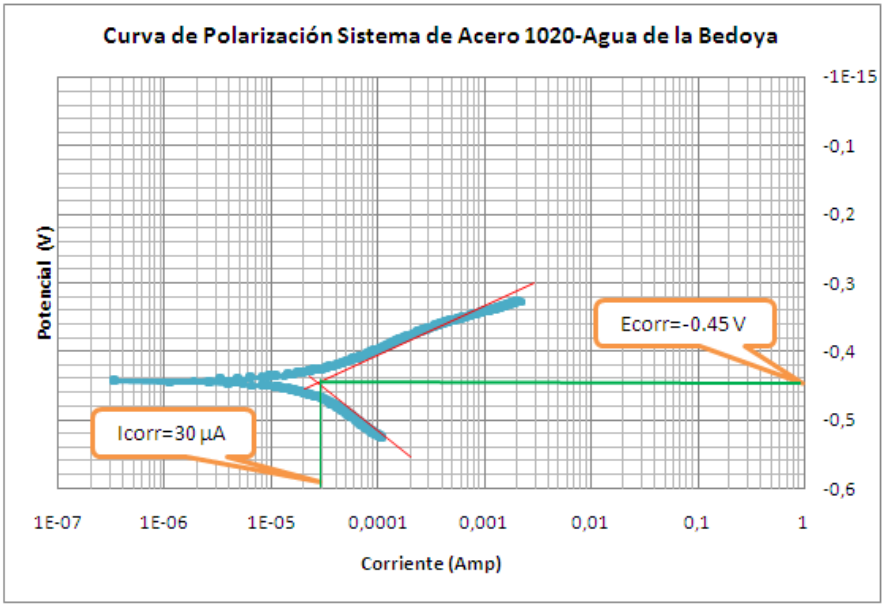


Grafica 2. Diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-Agua de la Tomilla.

Nota: El Potencialde equilibrio para la reacción Fe en contacto con agua de la Tomilla, es de -0.42+0.24= -0.18 a un pH= 7.5. Vemos que el fierro muestra una tendencia a corroerse y se encuentra en la región entre las dos líneas discontinuas, esto representa que el agua está estable.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

1.2. ACERO 1020 EN AGUA DE LA BEDOYA



Gráfica 3. Curva de Polarización Sistema de Acero 1020-Agua de la Bedoya

Cálculos de Datos:

- Icorr = 30 µA
- A= 5 cm^2
- $icorr = \frac{Icorr}{A} = \frac{30}{5} = 6\,\frac{\mu A}{cm^2}$
- Ecorr= -0.45 Voltios
- Densidad del Fe= 7.86 gr/cm^3
- Peso Atómico= 55.847
- Peso Equivalente= $\frac{\text{Peso Atómico}}{\text{Número de Valencia}} = \frac{55{,}847}{2} = 27.9235$

Hallamos la Velocidad de Corrosión

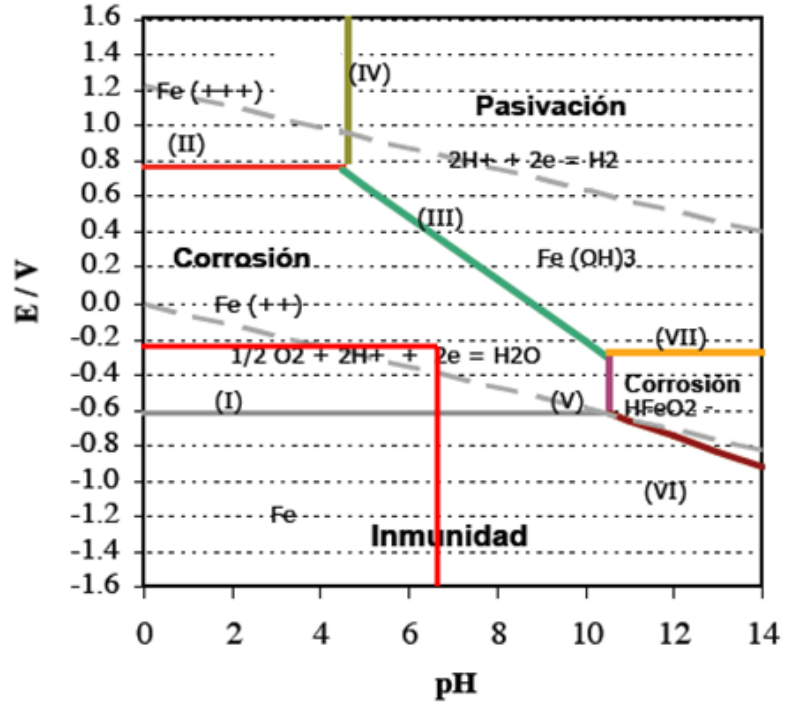
$$r = 0.13\,\frac{\text{icorr} * \text{eg}}{\rho}$$

$$r = 0.13\,\frac{6 * 27.9235}{7.86}$$

r = 2.771mils/año	**r = 70.383 Micrones/año**	**r = 0.073mm/año**

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Diagrama de Pourbaix

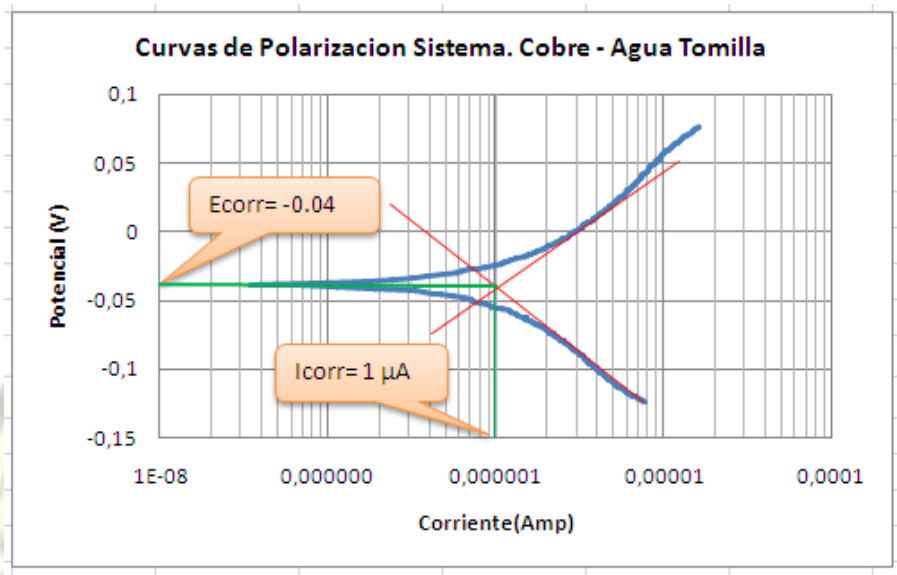


Gráfica 4. Diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-Agua de la Bedoya.

Nota: El Potencialde equilibrio para la reacción Fe en contacto con agua de la Bedoya, es de -0.41+0.24= -0.21 a un pH= 6.78. Vemos que el fierro muestra una tendencia a corroerse, y se encuentra en la región entre las dos líneas discontinuas, esto representa que el agua está estable.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

1.3. COBRE EN AGUA DE LA TOMILLA



Gráfica 5. Curvas de Polarización Sistema. Cobre - Agua Tomilla

Cálculos de Datos:

- Icorr = 1 µA
- A= 5.3 cm^2
- $icorr = \frac{Icorr}{A} = \frac{1}{5.3} = 0.1887 \frac{\mu A}{cm^2}$
- Ecorr= -0.04 Voltios
- Densidad del Cu= 8.4 gr/cm^3
- Peso Atómico= 63.546
- Peso Equivalente= $\frac{\text{Peso Atómico}}{\text{Número de Valencia}} = \frac{63.546}{2} = 31.773$

Hallamos la Velocidad de Corrosión

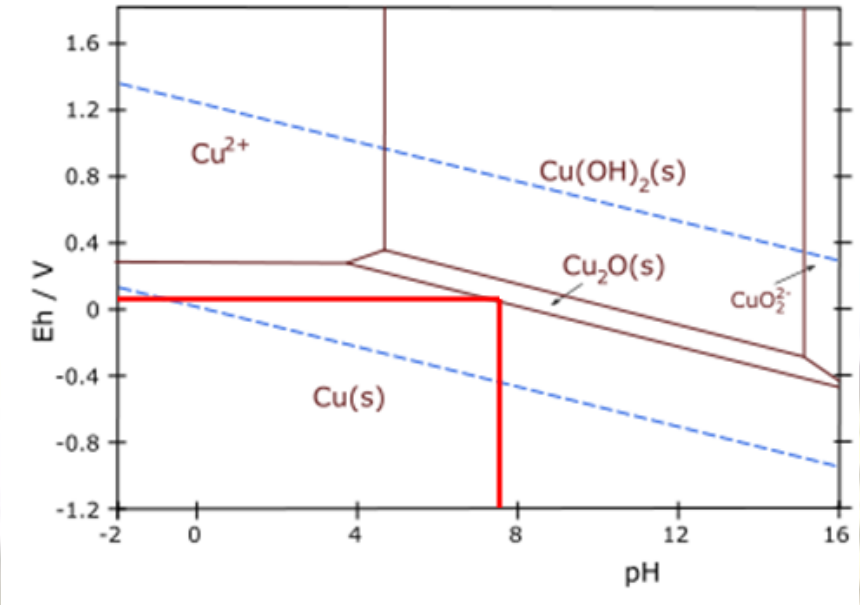
$$r = 0.13 \frac{icorr * eg}{\rho}$$

$$r = 0.13 \frac{0.1887 * 31.773}{8.4}$$

r = 0.0928 mils/año	**r = 2.957 Micrones/año**	**r = 0.0029mm/año**

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Diagrama de Pourbaix

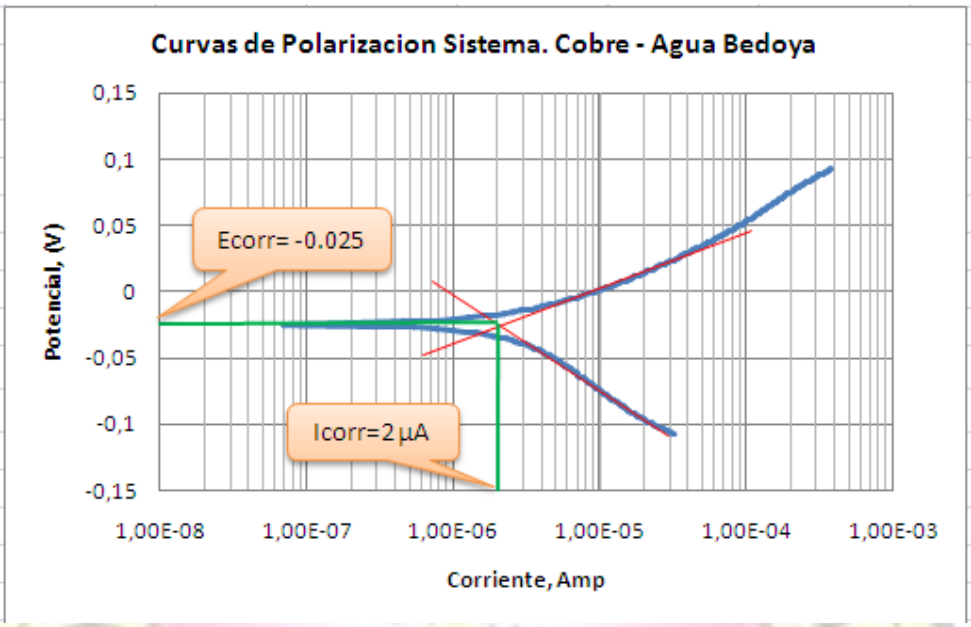


Grafica 6. Diagrama de Pourbaix para el sistema Cu-Agua de la Tomilla.

Nota: El Potencialde equilibrio para la reacción Cu en contacto con agua de la Tomilla, es de -0.04+0.24=0.2 a un pH= 7.5. Vemos que el cobre se encuentra en la zona de inmunidad muy cercana a la zona de pasividad, es decir que se encuentra termodinámicamente estable y que tiene una tendencia a formar un óxido en su superficie.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

1.4. COBRE EN AGUA DE LA BEDOYA



Gráfica 7.Curvas de Polarización Sistema. Cobre - Agua Bedoya

Cálculos de Datos:

- Icorr = 2 µA
- A= 5.3 cm^2
- $icorr = \frac{Icorr}{A} = \frac{2}{5.3} = 0.3774 \frac{\mu A}{cm^2}$
- Ecorr= -0.025 Voltios
- Densidad del Cu= 8.4 gr/cm^3
- Peso Atómico= 63.546
- Peso Equivalente= $\frac{\text{Peso Atómico}}{\text{Número de Valencia}} = \frac{63.546}{2} = 31.773$

Hallamos la Velocidad de Corrosión

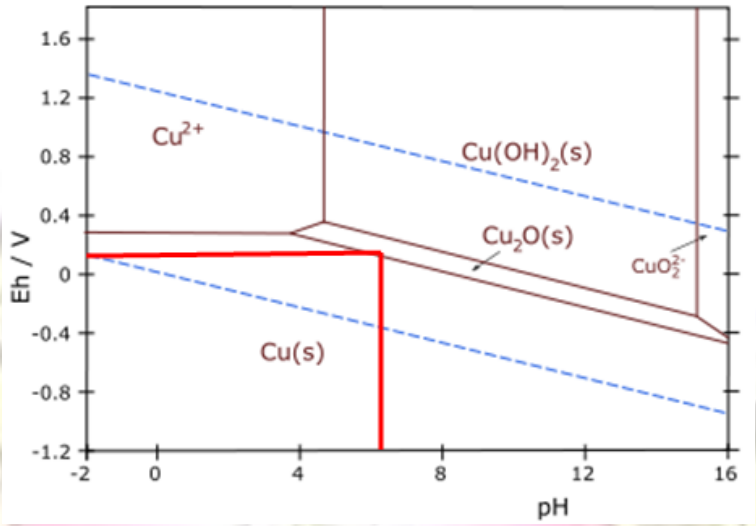
$$r = 0.13 \frac{\text{icorr} * \text{eg}}{\rho}$$

$$r = 0.13 \frac{0.3774 * 31.773}{8.4}$$

r = 0.1856mils/año	**r = 4.7137 Micrones/año**	**r = 0.0047mm/año**

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

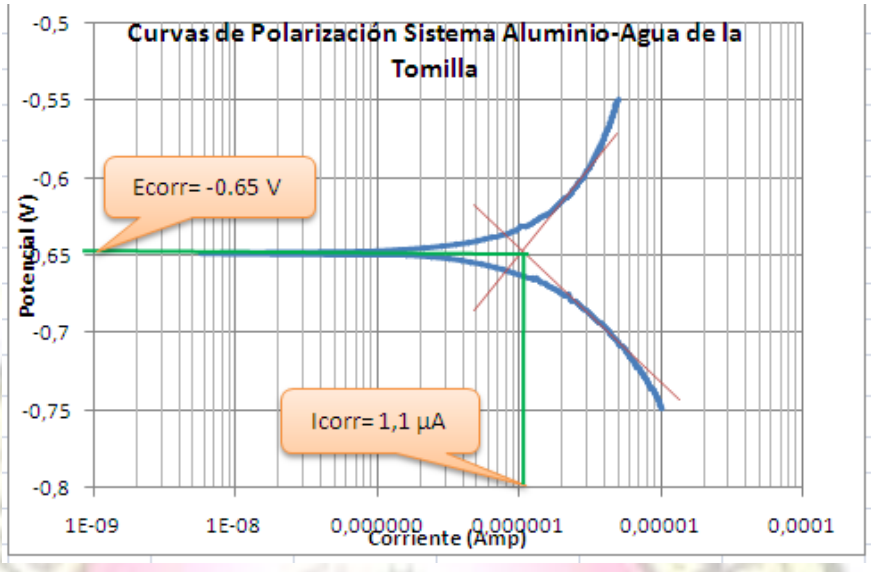
Diagrama de Pourbaix



Gráfica 8. Diagrama de Pourbaix para el sistema Cu-Agua de la Bedoya.

Nota: El Potencialde equilibrio para la reacción Cu en contacto con agua de la Bedoya, es de -0.025+0.24=0.215 a un pH= 6.78. Vemos que el cobre se encuentra en la zona de inmunidad muy cercana a la zona de pasividad, es decir que se encuentra termodinámicamente estable y que tiene una tendencia a formar un óxido en su superficie.

1.5. ALUMINIO EN AGUA DE LA TOMILLA



Gráfica 9. Curvas de Polarización Sistema. Aluminio-Agua de la Tomilla

Cálculos de Datos:

- Icorr = 1,1 µA
- A= 5.1 cm^2
- $icorr = \frac{Icorr}{A} = \frac{1,1}{5.1} = 0.21569 \frac{\mu A}{cm^2}$
- Ecorr= -0.65 Voltios
- Densidad del Al= 2.7 gr/cm^3
- Peso Atómico= 26,9815
- Peso Equivalente= $\frac{\text{Peso Atómico}}{\text{Número de Valencia}} = \frac{26.9815}{3} = 8.9938$

Hallamos la Velocidad de Corrosión

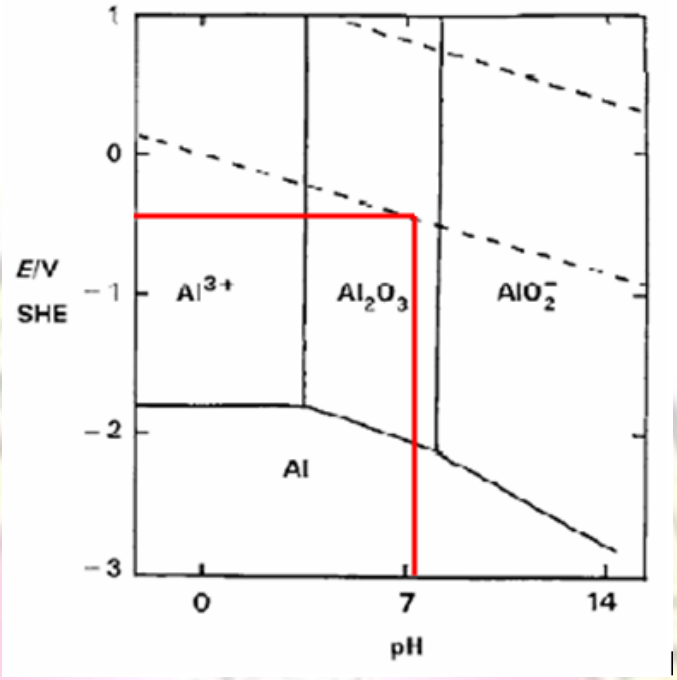
$$r = 0.13 \frac{\text{icorr} * \text{eg}}{\rho}$$

$$r = 0.13 \frac{0.21569 * 8.9938}{2.7}$$

r = 0.0934mils/año	**r = 2.3724Micrones/año**	**r = 0.0024mm/año**

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

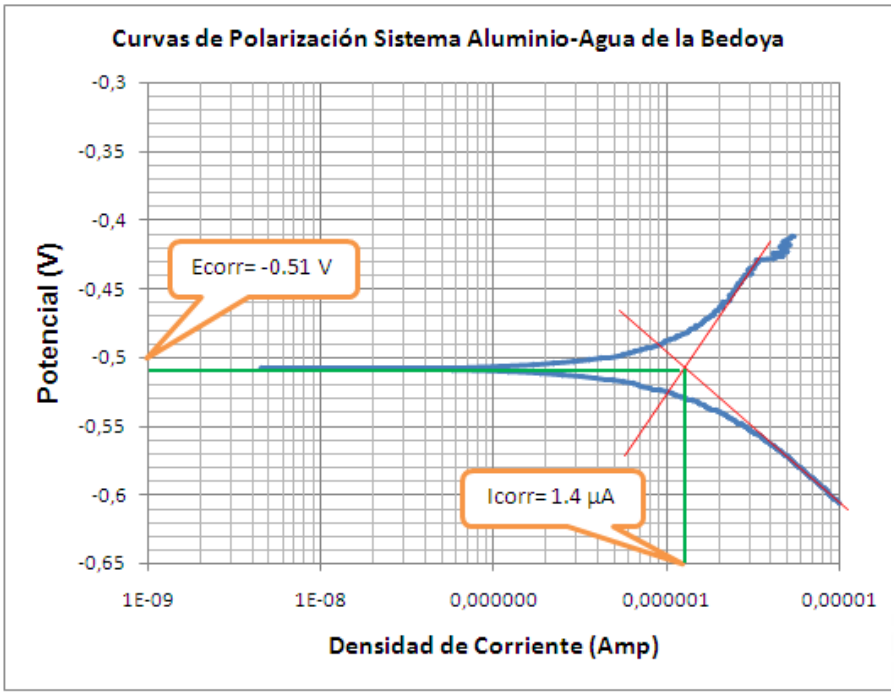
Diagrama de Pourbaix



Gráfica 10. Diagrama de Pourbaix para el sistema Al-Agua de la Tomilla.

Nota: El Potencialde equilibrio para la reacción aluminio en contacto con agua de la Tomilla, es de -0.65+0.24= -0.41 a un pH= 7.5. Vemos que el aluminio se encuentra en la zona de pasividad, es decir está formando un óxido en su superficie.

1.6. ALUMINIO EN AGUA DE LA BEDOYA



Gráfica 11. Curvas de Polarización Sistema Aluminio-Agua de la Bedoya

Cálculos de Datos:

- Icorr = 1,4 µA
- A= 5.1 cm^2
- $icorr = \frac{Icorr}{A} = \frac{1,4}{5.1} = 0.2745 \frac{\mu A}{cm^2}$
- Ecorr= -0.51 Voltios
- Densidad del Al= 2.7 gr/cm^3
- Peso Atómico= 26,9815
- Peso Equivalente= $\frac{\text{Peso Atómico}}{\text{Número de Valencia}} = \frac{26.9815}{3} = 8.9938$

Hallamos la Velocidad de Corrosión

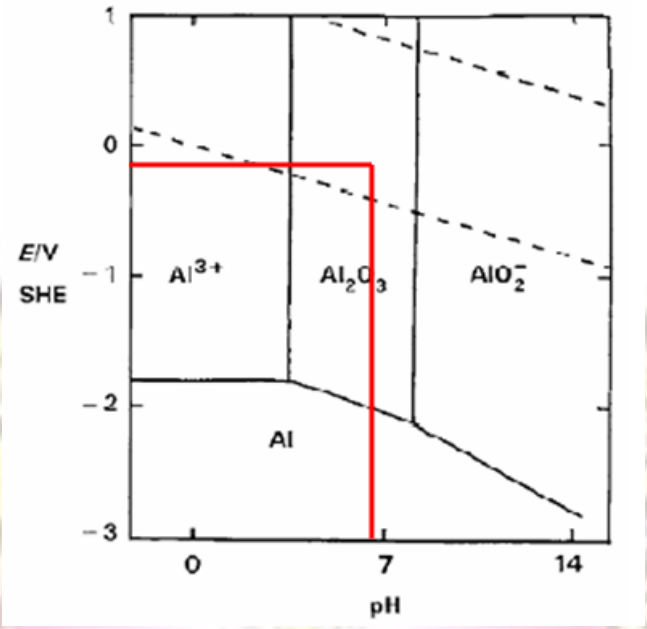
$$r = 0.13 \frac{\text{icorr} * \text{eg}}{\rho}$$

$$r = 0.13 \frac{0.2745 * 8.9938}{2.7}$$

r = 0.1189mils/año	**r = 3.0194Micrones/año**	**r = 0.0030mm/año**

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

Diagrama de Pourbaix



Gráfica 12. Diagrama de Pourbaix para el sistema Al-Agua de la Bedoya.

Nota: El Potencial de equilibrio para la reacción aluminio en contacto con agua de la Bedoya, es de -0.51+0.24= -0.27 a un pH= 6.78. Vemos que el aluminio se encuentra en la zona de pasividad, al igual que cuando se encuentra en contacto con el agua de la Tomilla, es decir que tiene una tendencia a formar un óxido en su superficie.

2. Mediante Índices de Estabilidad del agua

Los datos necesarios para obtener los índices de estabilidad del agua tanto de la planta de tratamiento de agua la Tomilla como de la Planta de Tratamiento de agua de la Bedoya, fueron proporcionados por la empresa de agua potable de Arequipa Sedapar s.a.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

TOMILLA												
Día	**pH**	**Alc**	**STD**	**Ca++**	**Temp.**	**A**	**B**	**C**	**D**	**pHs**	**LSI**	**RSI**
1	7,6	61	155	56	12,8	0,12	2,33	1,75	1,79	8,21	-0,61	8,83
2	7,6	58	155	51	12,3	0,12	2,34	1,71	1,76	8,29	-0,69	8,97
3	7,5	61	156	54	12,1	0,12	2,34	1,73	1,79	8,24	-0,74	8,99
4	7,6	58	154	55	11,9	0,12	2,34	1,74	1,76	8,26	-0,66	8,92
5	7,6	59	153	55	11,2	0,12	2,36	1,74	1,77	8,27	-0,67	8,94
6	7,6	58	155	57	11,4	0,12	2,35	1,75	1,76	8,26	-0,66	8,91
7	7,5	55	150	55	12,0	0,12	2,34	1,74	1,74	8,28	-0,78	9,06
8	7,5	55	148	50	12,3	0,12	2,34	1,70	1,74	8,32	-0,82	9,13
9	7,5	60	147	51	12,8	0,12	2,33	1,71	1,78	8,26	-0,76	9,02
10	7,5	55	144	49	11,9	0,12	2,34	1,69	1,74	8,33	-0,83	9,16
11	7,5	55	143	49	12,8	0,12	2,33	1,69	1,74	8,31	-0,81	9,13
12	7,5	57	142	51	12,2	0,12	2,34	1,71	1,76	8,29	-0,79	9,08
13	7,5	49	134	51	12,2	0,11	2,34	1,71	1,69	8,36	-0,86	9,21
14	7,5	51	140	47	13,3	0,11	2,32	1,67	1,71	8,35	-0,85	9,21
15	7,5	54	145	50	12,7	0,12	2,33	1,70	1,73	8,32	-0,82	9,13
16	7,5	54	138	47	12,8	0,11	2,33	1,67	1,73	8,34	-0,84	9,18
17	7,5	53	136	49	12,9	0,11	2,32	1,69	1,72	8,33	-0,83	9,15
18	7,5	50	130	45	13,1	0,11	2,32	1,65	1,70	8,38	-0,88	9,26
19	7,5	51	124	46	12,2	0,11	2,34	1,66	1,71	8,38	-0,88	9,26
20	7,5	55	131	43	11,5	0,11	2,35	1,63	1,74	8,39	-0,89	9,28
21	7,4	52	131	43	12,8	0,11	2,33	1,63	1,72	8,39	-0,99	9,38
22	7,5	51	120	41	11,8	0,11	2,35	1,61	1,71	8,44	-0,94	9,37
23	7,5	48	108	45	10,7	0,10	2,37	1,65	1,68	8,44	-0,94	9,38
24	7,5	48	113	40	12,7	0,11	2,33	1,60	1,68	8,45	-0,95	9,41
25	7,5	48	114	40	12,4	0,11	2,33	1,60	1,68	8,46	-0,96	9,42
26	7,5	52	118	42	10,3	0,11	2,38	1,62	1,72	8,45	-0,95	9,39
27	7,5	48	116	45	10,1	0,11	2,38	1,65	1,68	8,45	-0,95	9,41
28	7,5	46	111	49	9,4	0,10	2,39	1,69	1,66	8,45	-0,95	9,40
29	7,5	48	113	40	11,2	0,11	2,36	1,60	1,68	8,48	-0,98	9,47
30	7,4	49	106	37	13,6	0,10	2,31	1,57	1,69	8,46	-1,06	9,51
31	7,4	48	108	39	12,6	0,10	2,33	1,59	1,68	8,46	-1,06	9,53
BEDOYA												
	pH	Alc	STD	Ca++	Temp.	A	B	C	D	pHs	LI	RI
	6,78	139,2	484	108,4	17,6	0,17	2,23	2,03	2,14	7,52	-0,74	8,27

Tomilla	Max	-0,61	9,53
	Min	-1,06	8,83
	Promedio	-0,85	9,21

Tabla 6. Datos de los Índices de Langelier y Ryznar de la Planta de la Tomilla y la Bedoya

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

3. Valores de DBO

Los valores de DBO fueron obtenidos en el Laboratorio Analíticos del Sur, para ellos se necesito llevar las muestras respectivas del agua de la Tomilla y del agua de la Bedoya, y los resultados fueron entregados después de 5 días, utilizaron el método Winkler; y los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú / Apartado 2102

Telf: (054) 443294 Fax: (054) 444582 www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

INFORME DE ENSAYO LAS-14-04787

Pág: 1/1

Hoja de datos

Señores: Lisfani Quicaña Huayhua
Dirección: Villa Paraiso D-3 Lote 2 Cerro Colorado Arequipa
Atención: Lisfani Quicaña Huayhua
Proyecto: Tesis
Nro de muestras: 2
Muestreo a cargo de(l): Lisfani Quicaña Huayhua
Registro de muestreo: 217-14
Fecha de recepción: 08/09/2014
Fecha de ensayo: 08/09/2014
Fecha de emisión: 15/09/2014
Condiciones de recepcion de la muestra: Muestras debidamente conservadas con Temperatura de 6C
Observaciones :

Metodo de ensayo aplicado

*859 Demanda Bioquimica de Oxigeno (DBO-5): SMEWW - APHA - AWWA - WEF 22 st Ed. Part -5210 B. 5-DAY BOD TEST

Cod Int. #	Nombre de muestra	Matriz de la muestra	Lugar de muestreo	Punto de muestreo y/o coordenadas Coordenadas UTM Este / Norte	Fecha de inicio de muestreo	Hora de Inicio de muestreo	*859 DBO-5 mg/L
AG14000538	LA TOMILLA	Agua para Uso y Consumo Humano - Agua de Bebida	La Tomilla / Cayma / Arequipa / Arequipa	A 3 Cuadras de Saga Falabella	08/09/14	05:40 p.m.	0,5
AG14000539	LA BEDOYA	Agua para Uso y Consumo Humano - Agua de Bebida	Ciudad Blanca / Paucarpata / Arequipa	A 2 Cuadras del Terminal de Ciudad Blanca	08/09/14	03:00 p.m.	0,8

Laboratorios Analiticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico CIP 19474

Tabla 7. Datos del DBO de la planta de la Tomilla y de la Bedoya

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

RESULTADOS GENERALES		
Mediante Técnica Electroquímica (mm/años)		
Material	**Tomilla**	**Bedoya**
Acero 1020	0,052	0,073
Cobre	0,0029	0,0047
Aluminio	0,0024	0,0030
Mediante Índice de Estabilidad		
Langelier	-0,85	-0,74
Ryznar	9,21	8,27
Mediante la cantidad de Oxígeno (mg/l)		
DBO	0,5	0,8

Tabla 8. Resultados Generales

Nota: El agua que tiene un Índice de Langelier menor a cero es CORROSIVA
El agua que tiene un Índice de Langelier mayor a cero es INCRUSTANTE

El agua que tiene un Índice de Ryznar mayor a 7 es CORROSIVA
El agua que tiene un índice de Ryznar menor a 7 es INCRUSTANTE

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

CONCLUSIONES

- Vemos en el caso del ensayo de las Técnicas Electroquímicas, que el Acero 1020, el cobre y el aluminio tienden a corroerse con mayor facilidad cuando están expuestos al agua de la Bedoya, debido a que esta agua presenta un pH ácido y el agua de la Tomilla presenta un pH alcalino.

- La comparación de la tendencia a formar incrustaciones se realiza primero con el índice de Langelier y luego con el índice de Ryznar, el valor máximo de índice de Langelier del agua de la Tomilla es mayor (desde el punto de vista negativo) que el agua de la Bedoya, ambas aguas son corrosivas pero desde el punto de vista del índice de Langelier, este valor máximo nos indica mayor tendencia a la formación de incrustaciones. De acuerdo al índice de Ryznar ambas aguas son corrosivas con mayor tendencia al agua de la Bedoya a formar incrustaciones.

- Y por último en el caso de la cantidad de oxigeno hay una mínima diferencia, indicando que el agua de la Bedoya tiene mayor DBO que la Tomilla, esta presencia de oxigeno motiva que el agua de la Bedoya tienda a ser un poco más corrosiva.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que basándose en el valor del Índice de Langelier y Ryznar y ajustando los valores de pH y de alcalinidad del agua en el sistema de tratamiento del agua de la Tomilla y de la Planta de Tratamiento de la Bedoya, se podría asegurar la protección de la red, para que el agua no tenga un carácter óxido sino ligeramente incrustante a fin de recubrir de una ligera capa de incrustación protectora del interior de la red.

- Se debería proponer un estudio para investigar el efecto del cloro como agente promotor en la corrosión.

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

BIBLIOGRAFIA

[1] Félix Cesáreo Gómez de León Hijes, Diego J. Alcaraz Lorente, Manual Básico de Corrosión para Ingenieros, Editum, 2004

[2] Dr. Ing. Héctor Vargas C., MsSc e Ing. Mg. Daisy Gonzales Díaz, Fundamentos de Corrosión y Protección de Materiales Metálicos.

[3] http://www.ciens.ucv.ve/eqsol/Electroquimica/Clases/clases/P4.pdf

[4] Luis Bilurbina Alter, Francisco Liesa Mestres, José Ignacio Iribarren Laco, Corrosión y Protección, ediciones UPC, 2003.

[5] Félix Cesáreo Gómez de León Hijes, Diego J. Alcaraz Lorente, Manual Básico de Corrosión para Ingenieros, Editum, 2004

[6] Francisco J. Pancorbo Floristán 2011, Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación, editado 2011 Marcombo, S. A.

[7] Propuesta de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua Subterránea, Ing. Edwin N. Mamani Vilcapaza, Ministerio del Ambiente, Viceministerio de Gestión Ambiental, Dirección General de Calidad Ambiental, Lima 2012

[8] http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/3/7_Agua_superficial.pdf

[9] http://www.sedapar.com.pe/

[10]http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articuloses/flujoentuberias/corrosionentuberiashidraulicas/corrosionentuberiashidraulicas.html

Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa

ANEXOS

- REGLAMENTO DE CALIDAD DE LA PRESTACION DE LOS SERVICIOS DE SANEAMIENTO – SEDAPAR S.A.

- NORMAS OFICIALES PARA LA CALIDAD DEL AGUAPERÚ

- ASTM G1-03

- ASTM 102-89

- ASTM G3-13