

compAs
Grupo de Capacitación e investigación pedagógica



Neutralización:
aplicado a aguas residuales



Neutralización: **aplicado a aguas residuales**

Primera edición

Neutralización: aplicado a aguas residuales

Autores

Martha Bermeo Garay
Stefanie Michelle Bonilla Bermeo
Tony Wellington Coloma Coloma

julio 2017

Libro sometido a revisión de pares académicos.



Edición
Diagramación
Diseño
Publicación

Maquetación.

Grupo Compás

Cámara Ecuatoriana del Libro - ISBN-E: 978-9942-760-49-4

Guayaquil - Ecuador

PENSAMIENTO

“Debemos dejar de hipotecar el futuro al presente. Debemos detener la destrucción del aire que respiramos, del agua que bebemos, de la comida que ingerimos y de los bosques que inspiran temor reverencial en nuestro corazón. Necesitamos impedir la contaminación en la fuente, no tratar de limpiarla después. Es tiempo de recordar que la conservación es la forma de energía menos costosa y menos contaminante ..Necesitamos reunirnos y elegir una nueva dirección. Necesitamos transformar nuestra sociedad en una en que la gente viva en verdadera armonía entre las naciones, entre las razas humanas y con la naturaleza. Debemos reducir, reutilizar, reciclar y restaurar o pereceremos.”

(REV. JESSE JACKSON).

CONTENIDO

1. CONCEPTOS BÁSICOS	15
1.1. GENERALIDADES	15
1.2. TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	15
1.2.1. Tratamiento preliminar o pre tratamiento	16
1.2.2. Tratamiento primario	16
1.2.3. Tratamiento secundario	17
1.2.4. Tratamiento terciario	17
1.3. NEUTRALIZACIÓN	17
1.3.1. Definición	17
1.3.2. Síntesis histórica	18
1.4. DEFINICIÓN Y PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS ÁCIDOS Y LAS BASES	21
1.4.1. Definición de ácido y base por Brönsted-Lowry	21
1.4.2. Propiedades químicas de los ácidos	23
1.4.3. Propiedades químicas de las bases	24
1.4.4. Ácidos fuertes y débiles	24
1.4.5. Bases fuertes y débiles	25
1.4.6. Reacciones de Neutralización y sales	26
1.5. NEUTRALIZACIÓN DE EFLUENTES DIVERSOS	26
1.6. POTENCIAL DE HIDRÓGENO	27
1.6.1. Régimen de acidez y alcalinidad	29
1.7. VALORACIÓN ÁCIDO - BASE	30
1.7.1. Sistemas de control de pH	31
1.8. NEUTRALIZACIÓN DE LAS AGUAS Y AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	33
1.8.1. Neutralización de las aguas ácidas	33
1.8.2. Neutralización de las aguas alcalinas	34
1.9. AJUSTE DEL pH PARA LA ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS	35
1.10. MÉTODOS PARA NEUTRALIZAR RESIDUOS LÍQUIDOS INDUSTRIALES	36
1.11. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA NEUTRALIZACIÓN	37
1.12. REACTIVOS UTILIZADOS EN LA NEUTRALIZACIÓN	38
1.12.1. Carbonato de calcio en la forma de roca caliza	39
1.12.1.1. Composición	39
1.12.1.2. Clasificación de la caliza	41

1.12.1.3. Características	41
1.12.1.4. Propiedades de las rocas	41
1.12.1.5. Impacto ambiental	43
1.12.1.6. Características técnicas	43
1.12.1.7. Variedades comerciales	43
1.12.1.8. Producto de la caliza	44
2. APLICACIONES TECNOLÓGICAS	49
2.1. RUTAS TECNOLÓGICAS APLICABLES PARA EL TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE	49
2.2. PROCESOS DE NEUTRALIZACIÓN DE LOS RESIDUOS INDUSTRIALES LÍQUIDOS	51
2.2.1. Neutralización de las descargas industriales	51
2.2.1.1. Industrias que producen aguas ácidas y alcalinas	51
2.2.2. Procesos típicos de neutralización	52
2.2.2.1. Neutralizar aguas alcalinas	53
2.2.2.2. Neutralizar ácidos en lechos de caliza	54
2.2.3. Sistemas de neutralización de las aguas residuales ácidas	55
2.2.4. Sistemas de neutralización aplicados a drenajes ácidos de minerías	59
2.2.4.1. Canales abiertos de caliza	59
2.2.4.2. Pozos bifurcados	60
2.2.4.3. Drenaje anóxico en calizas	61
2.2.4.4. Reactores de flujo vertical	61
2.2.5. Control del proceso de neutralización	62
2.2.6. Control automático de la neutralización	62
2.3. MATERIA PRIMA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN	63
3. DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN LECHO DE FLUJO ASCENSIONAL DE CALIZA PARA LA NEUTRALIZACIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS ÁCIDOS	67
3.1. ANTECEDENTES	67
3.2. VARIABLES DE DISEÑO	67
3.3. FUNDAMENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS DE NEUTRALIZACIÓN	68
3.4. CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS	69
3.4.1. Diagrama del equipo	69
3.4.2. Instrumento de control y accesorios adicionales	71
3.4.2.1. Instrumento de control	71
3.4.2.2. Accesorios del equipo de neutralización	72

3.5. INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE LA UNIDAD	72
3.6. MANUAL DE OPERACIÓN DE LAS COLUMNAS	73
4. PRUEBAS EXPERIMENTALES A ESCALA DE LABORATORIO CON DIFERENTES REACTIVOS NEUTRALIZANTES	77
4.1. ANTECEDENTES	77
4.2. NEUTRALIZACIÓN DE UN ÁCIDO FUERTE CON UNA BASE FUERTE	77
4.2.1. Neutralización de una solución de ácido clorhídrico 0,1 N con diferen- tes reactivos alcalinos fuertes	77
4.2.1.1. Neutralización de una solución de ácido clorhídrico 0,1 N con hidróxido de sodio 0,1 N	77
4.3. NEUTRALIZACIÓN DE UN ÁCIDO DÉBIL CON UNA BASE FUERTE	80
4.3.1. Neutralización de una solución de ácido acético 0,1 N con hidróxido de sodio 0,1 N.	80
4.4. NEUTRALIZACIÓN DE UNA BASE DÉBIL CON UN ÁCIDO FUERTE	82
4.4.1. Neutralización de una solución de hidróxido de amonio 0,1 N con ácido clorhídrico 0,1 N.	82
4.5. PRUEBAS EXPERIMENTALES EN COLUMNAS DE LABORATORIO CON PIEDRA CALIZA EN PROCESO CONTINUO	84
4.5.1. Neutralización utilizando una columna con lecho de caliza de 30, 60, 90 y 120 cm de profundidad de relleno y una granulometría de 6 mm con una solución sintética de ácido clorhídrico 0,1 N en proceso continuo	84
4.5.1.1. Calibración del rotámetro de las columnas de laboratorio	84
4.5.1.2. Calibración del rotámetro	85
4.5.2. Neutralización utilizando una columna con lecho de caliza de 30, 60, 90, 120 cm de altura de relleno con una solución de ácido clorhídrico 1n en proceso continuo	86
4.6. EXPERIMENTACIÓN CON AGUAS REDUALES INDUSTRIALES	89
4.6.1. Experimentación con un efluente industrial ácido, generado por una destilería de alcohol (vinaza)	89
4.6.2. Neutralización del agua residual ácida de una destilería de alcohol (vi- naza), utilizando NaOH 0,1 N en proceso discontinuo	89
4.6.2.1. Pruebas experimentales de agua residual ácida (vinaza) neutra- lizada en lechos de caliza, en proceso discontinuo.	91
4.6.2.2. Neutralización de vinaza, utilizando caliza de 4 mm de granu- lometría	91
4.6.2.3. Neutralización de vinaza, utilizando caliza de 6 mm de granu- lometría	93
4.6.3. Neutralización del agua residual ácida de una industria de café soluble, utilizando NaOH 0,1 N en proceso discontinuo	95

4.6.4. Pruebas experimentales de agua residual ácida de una industria, neutralizada en lechos de caliza, en proceso continuo	97
4.6.5. Relación entre el ph del afluente y la carga hidráulica en la columna de neutralización a diferentes profundidades de lecho de caliza con granulometría 6 mm.	97
4.7. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN LECHO DE FLUJO ASCENSIONAL DE CALIZA, DE UN RESIDUO LÍQUIDO ÁCIDO DE UNA INDUSTRIA DEL CAFÉ, BASADO EN LA INVESTIGACIÓN.	99
4.8. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO	99
4.8.1. Datos experimentales	100
4.8.2. Determinación de la profundidad óptima del lecho	100
4.9. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CALIZA CONSUMIDA DIARIAMENTE	101
5. BIBLIOGRAFÍA	105
6. NOMENCLATURA	107
7. ABREVIATURAS	113

INTRODUCCIÓN

Este libro es una aplicación de un tratamiento primario a las aguas residuales que requieran ser neutralizadas. Se basa fundamentalmente en el estudio de los diferentes métodos de neutralización, considerando que éste proceso es indispensable en ciertos casos para realizar tratamientos posteriores o para descargar un agua residual a un sistema de alcantarillado o a un cuerpo hídrico.

A lo largo del texto se hace una descripción de los diferentes procesos utilizados en neutralización de aguas residuales industriales acidas y alcalinas. Además presenta experimentaciones a escala de laboratorio con diferentes reactivos neutralizantes. Se plantea procedimientos de diseño de sistemas de neutralización aplicados a residuos líquidos generados por determinadas industrias.

La parte teórica se encuentra armonizada con problemas de aplicación lo cual hace un texto con muy versátil y fácil de aplicar. Y permiten al profesional evaluar cualquier tipo de proceso para ser aplicado en neutralización así como también seleccionar los reactivos y diseñar equipos que sean más adecuados para un tratamiento de agua residual industrial.

Martha Bermeo Garay



CAPÍTULO I

CONCEPTOS BÁSICOS

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. GENERALIDADES

La aplicación de procesos físico-químicos y/o bioquímicos para el tratamiento de efluentes industriales ocurrió, históricamente, con posterioridad a la utilización masiva de procesos industriales; es decir, fue de interés para la humanidad la producción industrial antes que considerar que los procesos de transformación producían impactos negativos sobre el medio ambiente.

Hoy, el diseño de una planta industrial debe contemplar, desde la ingeniería conceptual, hasta que el diseño global del sistema lleve las descargas de los residuos gaseosos, sólidos y líquidos a cumplir las normativas ambientales vigentes, buscando, además, la reutilización completa de materiales.

Durante el tiempo cuando el tratamiento de los residuos líquidos, se instalaba al final de la planta industrial, conocido como procesos al final de la tubería o “end of pipe” (práctica que aún tiene cabida en el diseño moderno), se utilizaron esquemas que se fueron depurando con cada nuevo caso enfrentado. Así, surgió la Ingeniería Ambiental que sistematiza las normas de diseño que se utilizan, en la práctica, para depurar los efluentes industriales.

Otro aspecto importante es la determinación de los agentes contaminantes, la caracterización físico química de los efluentes y la naturaleza de los iones causantes de la acidez o alcalinidad, para lo cual, se deben plantear alternativas de tratamiento; se construyen curvas de valoración a nivel de laboratorio, para seleccionar el tipo de producto químico a utilizar, la dosificación de reactivos, lo cual es crítico en el diseño de los sistemas de tratamiento cuando existe la necesidad de controlar el pH en los rangos estrechos de valores (5-9).

1.2. TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Los tratamientos aplicados a las aguas residuales industriales o domésticas pueden ser de diferentes tipos dependiendo de los resultados obtenidos de la caracterización de los efluentes. A continuación, se presentan los tratamientos que se pueden utilizar:

- Tratamiento preliminar.
- Tratamiento primario.
- Tratamiento secundario.
- Tratamiento terciario.

1.2.1. Tratamiento preliminar o pre tratamiento

Su objetivo básico es separar todas las materias gruesas y/o visibles que lleva el agua residual; y en ciertos casos como acondicionador, se deben eliminar:

- Residuos sólidos.
- Partículas discretas sedimentables o arena.
- Grasas, flotantes y espuma.
- Homogeneización.

Las operaciones que comprenden son: desbaste, desarenado y desengrasado, aunque, en algunos casos, pueden incluir preaireación, tamizado, pre decantación, etc.

El término pre-tratamiento conlleva a la misma noción de adaptar a las condiciones de los procesos que continúan sin implicar una notación de orden (primario, secundario y terciario). Puede darse el caso de que un pre tratamiento, por ejemplo, una homogeneización del flujo, seguido de una neutralización de acidez, sea todo lo que una industria requiere; en dicho caso; la homogeneización y neutralización serán las únicas etapas necesarias de tratamiento para esa industria (Leandro Herrera Z. Ph.D., 2013).

1.2.2. Tratamiento primario

Implica la remoción de sólidos suspendidos y, por consiguiente, la reducción de la turbidez y parcialmente la DBO₅, ya que el material removido contiene materia orgánica en suspensión, se elimina una fracción de la contaminación bacteriológica. Al eliminarse los sólidos suspendidos, también se eliminan los sedimentables.

La noción de tratamiento primario, se encuentra en eventos históricos; proviene del tiempo en que los “tratamientos” se aplicaban a las aguas servidas y resultaba necesario instalar ciertas operaciones de retención de sólidos previo a la descarga a cauces superficiales o el mar. Dado que, posteriormente, se aplicaron otros tratamientos, a continuación de éste, se les llamaron primarios (Leandro Herrera Z. Ph.D., 2013).

En definitiva, los términos no tienen función alguna más allá de ayudar a organizar los conceptos; incluyen las operaciones unitarias y los procesos unitarios siguientes:

- Decantación primaria.
- Flotación.
- Neutralización (acidez, alcalinidad).
- Filtración.
- Coagulación - floculación.

1.2.3. Tratamiento secundario

La expresión tratamiento secundario, se refiere a todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aerobio como anaerobio, algunos tratamientos, se mencionan a continuación:

- Lodos activados.
- Lagunas con aireación.
- Filtros biológicos.
- Discos biológicos.
- Tratamientos anaerobios: procesos de contacto, filtros sumergidos.

1.2.4. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario, conocido también como avanzado, consiste en una serie de procesos destinados a conseguir una calidad superior del efluente a la del tratamiento secundario (Ramalho, Beltrán, & Lora, 1990, pág. 585).

A continuación, se mencionan algunos tipos de tratamiento terciario:

- Separación de sólidos mediante la filtración por membranas: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.
- Adsorción en carbón activado.
- Intercambio iónico.
- Electrodialisis.
- Oxidación química (con cloro y ozono).
- Métodos de eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo).

1.3. NEUTRALIZACIÓN

1.3.1. Definición

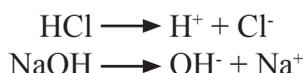
Este término se refiere a todos los tratamientos destinados a llevar al agua a un pH próximo a la neutralidad, o bien a un pH próximo al pH de equilibrio, puesto que, inicialmente, el agua puede ser ácida o alcalina (Degrémont, 1979, pág. 94).

La reacción mediante la cual una base neutraliza las propiedades de un ácido recibe el nombre de neutralización y se ajusta, en términos generales, a una ecuación química del tipo (FísicaNet, 2007):

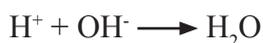


De acuerdo con la teoría de Arrhenius, la neutralización, se reduce a una reacción entre los iones H^+ y OH^- característicos, respectivamente, de ácidos y bases para formar agua.

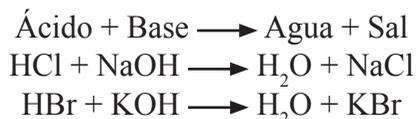
Cuando se mezclan una solución ácida y otra alcalina, que contiene cada una un equivalente (Noriega Editores, 2001, pág. 66):



La solución resultante contendría un equivalente de H^+ y un equivalente de OH^- , además del Na^+ y el Cl^- . Ya se ha afirmado que el agua ioniza produciendo iones H^+ y OH^- hasta una concentración de 0.000 000 1 equivalentes por litro. En consecuencia, en la solución que resulta de mezclar las otras dos soluciones, los iones H^+ y OH^- se combinarán para producir agua, hasta que la concentración que quede de cada uno sea de 0.000 000 1 equivalentes según la reacción (Noriega Editores, 2001, pág. 67) :



La reacción de neutralización de un ácido con una base siempre producirá agua y sal, tal como se muestra abajo:



1.3.2. Síntesis histórica

El desarrollo histórico del concepto de neutralización está ligado al descubrimiento y la utilización a través de la historia de los ácidos y de las bases así como de la clasificación de las sustancias como ácidos o como bases utilizando fenómenos observables. No se puede estudiar la neutralización ácido-base sin comprender qué se entendía por ácido o por base en cada momento histórico (Jiménez Liso & De Manuel Torres, 2002). Antes de que se conociera el comportamiento, a nivel molecular, de estos tipos de sustancias, se las reconocían por sus propiedades características. Esta idea de definir el ácido y la base indicando el comportamiento químico de una sustancia para que pueda considerarse como miembro de una u otra familia de compuestos, fue introducida por Boyle en 1663. Posteriormente, un conocimiento más preciso de las fórmulas químicas llevó a algunos investigadores como Justus Von Liebig (1803-1873) a definir los ácidos por su composición molecular; sin embargo, la idea de Boyle, aunque transformada con las definiciones sucesivas de ácidos y bases, sigue aún vigente.

Los productos que ahora consideramos como ácidos y como bases se conocen desde la antigüedad como así lo ponen de manifiesto algunas recetas prácticas encontradas en papiros de la cultura helenística (en Estocolmo y en Leiden). A pesar de que no se hacía ninguna interpretación de lo que ocurría en los procesos que se describen, en estas recetas sí se utilizaban el vinagre y los zumos de frutas como disolventes de ciertos metales, y se conocían algunas sales como la sal común, el carbonato de sodio, el sulfato de hierro, etc (Jiménez Liso & De Manuel Torres, 2002).

Durante la edad media, concretamente en el mundo árabe, también se utilizaron recetas de tipo práctico como, por ejemplo, la de al-Razi en la que aparece la primera clasificación en la cual se engloban varias sustancias atendiendo a cualidades semejantes, aunque no puede tomarse como una interpretación de los hechos que exponen.

A lo largo del siglo XIII, en el Occidente cristiano, como consecuencia del perfeccionamiento en las técnicas alquimistas, concretamente de la destilación, se obtuvieron los ácidos minerales. Con su descubrimiento, los químicos pudieron disolver más sustancias y realizar más reacciones en disolución que con los ácidos orgánicos que hasta entonces se utilizaban. Pero, a pesar de que se perfeccionaron las técnicas, se utilizaron un mayor número de ácidos minerales y con ellos se aumentaron los procesos en los que participaban, no llegó a interpretarse teóricamente qué ocurría en esos procesos ni la naturaleza de las sustancias descubiertas.

Con respecto al concepto de neutralización hay que iniciar la revisión histórica en el mundo antiguo. A pesar de que no se hablaba de reacciones, ni de ácidos, ni de bases, sí se manejaba el concepto filosófico de los contrarios y el concepto de intermedio era representado por el número mítico tres. En esta línea también Heráclito de Éfeso (s. VI aC) interpretó que la lucha de los opuestos era la armonía, aunque, según este autor, para conseguir la armonía, no desaparecían los contrarios.

Esta misma idea aparece en la primera interpretación sobre la neutralización que corresponde a un médico de Caen de 1672:

“Las puntas de los ácidos son tan conformes, en figura y dimensiones, con los orificios de los álcalis, que los llenan exactamente, de tal modo que un nuevo ácido no encuentra ya ningún poro vacío que pueda detener su movimiento; este ácido actúa entonces con tanta violencia, que separa las unas de las otras partes integrantes en esos cuerpos, empuja unas de un lado, otras de otro y no deja de removerlas y agitarlas hasta que lo separa de ellas.” (Tatón, 1988)

Lémery, otro químico muy influyente de la época, considera la neutralización como la reacción entre los álcalis y los ácidos, en cuyos poros penetran las púas de estos últimos, rompiéndose o embotándose y dando así origen a las sales neutras. Lo que parece una simple reflexión sobre la naturaleza de los ácidos, las bases y las sales representa, sin embargo, un

intenso debate que se estableció en este siglo y que enfrentaba a los que afirmaban que el ácido era el agente único o universal, frente a los que defendían el antagonismo entre ácido y álcali. Entre éstos últimos, Boyle, definía los ácidos por su efervescencia en contacto con los álcalis o viceversa. El debate se resolvió a favor de éstos al demostrar Boyle que los ácidos podían descomponerse y que un gran número de cuerpos no contenían ningún ácido, por lo que no podía constituir un agente universal. A este autor se debe la primera clasificación de ácidos y bases basada en fenómenos observables (ser corrosivos, disolver metales, reaccionar con ácidos o con bases, el color de las disoluciones ácidas o básicas con indicadores como el licor de violetas, etc.) (Jiménez Liso & De Manuel Torres, 2002).

Durante siglos se produjo una acumulación preteórica de conocimientos químicos (utilización de ácidos, clasificación de las sustancias ácidas y básicas, perfeccionamiento de los trabajos prácticos, etc.). Ello condujo a que en el siglo XVIII se utilizara la neutralización como la reacción entre un ácido y una base para formar una sal (estos tres términos definidos según sus propiedades observables descritas por Boyle). La utilización de este término se aplicó tanto a las soluciones acuosas como en la fabricación de vidrios donde reaccionaban tierras ácidas con otras básicas a altas temperaturas.

Con la introducción de un cuerpo teórico de conocimientos (la química del siglo XIX), se buscó explicación a estos procesos. Por ejemplo, desde la teoría de la disociación iónica de Arrhenius (1887) se interpreta la neutralización como la combinación de los iones hidrógeno e hidróxido para formar agua. Arrhenius relacionó las propiedades de los ácidos con la presencia de iones hidrógeno libres y las de las bases con los iones hidróxido; un producto neutro sería aquél que no cediera iones hidrógeno ni hidróxido. En esta teoría se establece una escala absoluta de clasificación de las sustancias como ácidas, neutras o básicas según la constante de su disociación electrolítica (Jiménez Liso & De Manuel Torres, 2002).

La forma de presentación clásica de las teorías ácidobase a los estudiantes universitarios y de secundaria consiste en exponer la definición de lo que cada una entiende por ácido, por base y por neutralización; este último concepto entendido como proceso que transcurre cuando se ponen en contacto los ácidos y las bases: según las teorías ionotrópicas (o teoría de los disolventes, inspirada en los postulados de Franklin, 1912), las sustancias se clasifican como “cationotrópicas” o “anionotrópicas” según el ion que se transfiera. Así, en un sistema anionotrópico, los ácidos se definen como “aceptadores” de aniones y las bases como “dadoras” de aniones y, por el contrario, en un sistema cationotrópico las bases son las que aceptan los cationes y los ácidos los que los ceden. La neutralización, según la teoría de los disolventes, es la combinación del anión característico del disolvente con el catión característico del disolvente para formar éste (Jiménez Liso & De Manuel Torres, 2002).

En 1923, Brønsted y Lowry definen los ácidos como las especies que tienen tendencia a donar protones y las bases como las especies capaces de aceptarlos. La neutralización según esta teoría es la transferencia de un protón de un ácido a una base en cualquier disolvente. La formación de sales también está incluida dentro de los procesos ácido-base porque

conlleva la transferencia de un protón desde un ácido a una base. Para Brönsted-Lowry ya no hay una clasificación absoluta de acidez, neutralidad o basicidad. Según esta teoría, la fuerza de un ácido se mide por la mayor o menor tendencia a donar un protón y la fuerza de una base por su mayor o menor tendencia a captarlo. Cuantitativamente se mediría por el grado en que los reaccionantes se convierten en productos, pero el grado de esa reacción depende tanto de la tendencia de un ácido a ceder un protón como la de la base a aceptarlo, es decir, son medidas relativas y la única manera de comparar las fuerzas de dos ácidos es tomando como referencia una misma base, que será el agua para reacciones en disolución acuosa. También en 1923, Lewis propone una teoría cuyos postulados llevan a la conclusión de que la neutralización consiste en la formación de un enlace coordinado entre la base que cede el par de electrones y el ácido que los acepta. Esta definición tampoco ofrece un criterio absoluto de clasificación de una sustancia como ácida, neutra o básica sino que siempre dependerá de la/s sustancia/s con las que se compare (Jiménez Liso & De Manuel Torres, 2002).

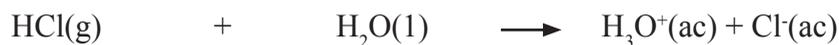
En 1939, Lux y Flood definieron como base toda sustancia capaz de ceder iones óxido y como ácido, las sustancias capaces de aceptarlos. Tanto la teoría de Brönsted-Lowry como la de Lux-Flood son dos casos particulares de las teorías «ionotrópicas», es decir, definiciones de ácidos y bases basadas en los procesos de transferencia de iones, protones en el primer caso e iones óxido en el caso de Lux-Flood (Moeller, 1988).

En este mismo año, Usanovich (1939) define los ácidos como las sustancias que forman una sal con las bases por un proceso ácido-base, que da cationes o que se combina con los aniones o con los electrones. De forma similar, las bases son las sustancias que reaccionan con los ácidos, que dan aniones o electrones o que se combinan con los cationes. Hay que destacar que en esta teoría se incluyen todos los procesos ácido-base posibles: transferencia de protones, de otros iones (los del disolvente, iones óxido, iones hidroxilo, etc.) o de electrones (Jiménez Liso & De Manuel Torres, 2002).

1.4. DEFINICIÓN Y PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS ÁCIDOS Y LAS BASES

1.4.1. Definición de ácido y base por Brönsted-Lowry

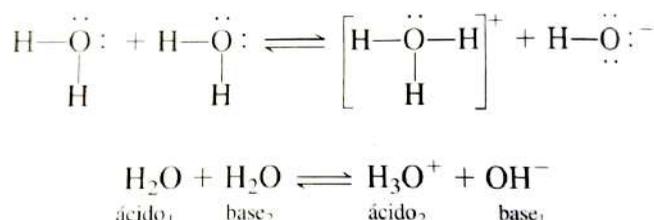
La disociación de un ácido genérico, fórmula HCl, en un medio acuoso, lleva consigo la cesión de un H⁺ a una molécula de agua según una reacción del tipo (Burns, 2003, pág. 483):



Donador de protones Receptor de protones

En ocasiones, a esta reacción se la conoce como autoionización del agua. Para describir las

propiedades ácido-base del agua, según el esquema de Brønsted (Chang & Goldsby, 2013, pág. 670), la autoionización del agua se expresa como sigue :



Los pares conjugados ácidos-base son:

- 1) H₂O (ácido) y OH⁻ (base)
- 2) H₃O⁺ (ácido) y H₂O (base)



Figura 1. Autoionización del agua en partículas
Fuente: (Theodore L., H. Eugene, Bruce E., & Julia R., 2003)

Razonamientos de este estilo llevaron al químico danés J. N. Brønsted (1897- 1947) y al químico inglés T. M. Lowry (1847-1936), proponer las definiciones siguientes de ácido y base (FisicaNet, 2007):

- Ácido.- es toda sustancia capaz de ceder uno o más protones a otra molécula, pues dona ion hidrógeno, H⁺.
- Base.- es una sustancia capaz de aceptar uno o más protones de otra molécula, pues acepta ion hidrógeno, H⁺ (Burns, 2003, pág. 483).

El comportamiento del amoníaco (NH₃), se explica como consecuencia de la reacción siguiente con el agua (Burns, 2003, pág. 484):



El NH₃ actúa como base captando un protón de la molécula de agua convirtiéndose en ión amonio y dejando libre, como es el caso de los hidróxidos, grupos OH⁻.

Estas nuevas definiciones de ácido y base salvan los inconvenientes de las de Arrhenius, pudiendo ser aplicadas independientemente del solvente en el que tiene lugar la donación o aceptación de protones.

Fuerza de ácidos y bases

Según los conceptos de ácido y base de Brønsted-Lowry, la fuerza de un ácido, se mide por su tendencia a ceder protones y la de una base por su tendencia a aceptarlos; también, se puede definir por referencia al equilibrio de disociación en disolución acuosa. Así, para un ácido genérico, HCl, en disolución, se produce la reacción reversible (Burns, 2003, pág. 483):



Constante de acidez (K_a) de disociación del ácido está dada por la siguiente ecuación de equilibrio tomada como referencia (Burns, 2003, pág. 459):

$$K_a = \frac{[A^-][H_3O^+]}{[HA]}$$

Si el ácido es fuerte, que se ioniza en agua por completo, su tendencia a ceder protones desplazará considerablemente el equilibrio hacia la derecha y la disociación será prácticamente total, lo que se reflejará en un valor elevado de K_a .

Análogamente, para una base genérica, B:



La constante de disociación de la base o constante de basicidad, K_b , será, en este caso:

$$K_b = \frac{[BH^+][OH^-]}{[B]}$$

Cuanto mayor sea K_b más desplazado estará el equilibrio hacia la derecha y, por tanto, mayor será la fuerza de la base o su capacidad para captar protones y convertirse en BH^+ .

1.4.2. Propiedades químicas de los ácidos

El comportamiento químico de los ácidos, se resume en las siguientes propiedades (ASOCAE ONGD, 2012):

- 1) Poseen un sabor agrio. La palabra ácido procede, precisamente, del latín (acidus = agrio) y recuerda el procedimiento de los químicos antiguos de probarlo todo, que fue el origen de un buen número de muertes prematuras por envenenamiento dentro de la profesión.
- 2) Colorean de rojo el papel tornasol. El tornasol es un colorante violeta en disolución acuosa (tintura de tornasol) que puede cambiar de color según el grado de acidez de la disolución. Impregnado, en papel, sirve para indicar el carácter ácido de una disolución. Es pues, un indicador.
- 3) Sus disoluciones conducen la electricidad. La calidad de una disolución ácida como conductor depende no sólo de la concentración del ácido, sino también de la naturaleza de éste, de modo que, en igualdad de concentración, la comparación de las conductividades de diferentes ácidos permite establecer una escala de acidez entre ellos.
- 4) Desprenden gas hidrógeno cuando reaccionan en disolución con zinc o algunos otros metales.
- 5) Reaccionan con las bases para formar una sal y agua.

1.4.3. Propiedades químicas de las bases

Las bases, también llamadas álcalis, fueron caracterizadas en un principio por oposición a los ácidos. Son sustancias que intervienen en aquellas reacciones en las que se consigue neutralizar la acción de los ácidos. Cuando una base, se añade a una disolución ácida elimina o reduce sus propiedades características (ASOCAE ONGD, 2012). Otras propiedades de las bases son las siguientes:

- Tienen un sabor amargo característico.
- Al igual que los ácidos en disolución acuosa, conducen la electricidad.
- Colorean de azul el papel tornasol.
- Reaccionan con los ácidos para formar una sal más agua.

1.4.4. Ácidos fuertes y débiles

Entre los mas importantes tomados de (Burns, 2003, pág. 474) tenemos:

Tabla 1. *Ácidos mas importantes*

Ácidos fuertes		Ácidos débiles	
Nombre	Fórmula	Nombre	Fórmula
Ácido clorhídrico	HCl	Ácido fosfórico	H ₃ PO ₄
Ácido bromhídrico	HBr	Ácido carbónico	H ₂ CO ₃
Ácido yodhídrico	HI	Ácido acético	CH ₃ COOH
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	Ácido cítrico	C ₃ H ₅ (COOH) ₃
Ácido nítrico	HNO ₃	Ácido láctico	CH ₃ CHOHCOOH
Ácido perclórico	HClO ₄	Ácido bórico	H ₃ BO ₃

Fuente: (Burns, 2003, pág. 474)

1.4.5. Bases fuertes y débiles

Las bases más importantes tenemos según (Burns, 2003, pág. 476):

Tabla 2. *Bases fuertes y débiles*

Nombre	Fórmula	Comentario
Bases fuertes		
Hidróxido de sodio	NaOH	Conocido como lejía o sosa cáustica; se emplea en la fabricación de productos químicos (50%), papel, jabón, etcétera.
Hidróxido de potasio	KOH	Se utiliza en la industria y en ciertos limpiadores de hornos.
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	Poco soluble en H ₂ O; su solución acuosa saturada se conoce como agua de cal
Bases débiles		
Hidróxido de magnesio	Mg(OH) ₂	Poco soluble en H ₂ O; la suspensión de Mg(OH) ₂ sólido en H ₂ O recibe el nombre de leche de magnesia.
Amoniaco acuoso	NH ₃ (ac)	Muy soluble en agua; el NH ₃ acuoso es un ingrediente de muchos limpiadores domésticos.
Hidróxidos de metales de transición		Muy poco soluble en agua

Fuente: (Burns, 2003, pág. 476)

1.4.6. Reacciones de Neutralización y sales

La disolución de ácidos y bases tienen propiedades muy distintas. Son reacciones entre ácido clorhídrico y otra base, $Mg(OH)_2$, que es insoluble en agua. Vemos cómo una suspensión blanca lechosa de $Mg(OH)_2$, llamada leche de magnesia, se disuelve durante la reacción de neutralización según (Theodore L., H. Eugene, Bruce E., & Julia R., 2003) (Figura 2):

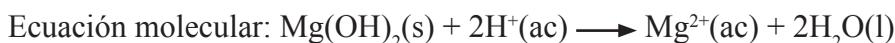
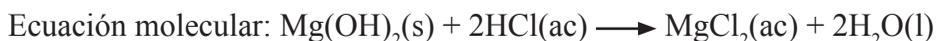


Figura 2. *Reacción de neutralización en leche de magnesia*
Fuente: (Theodore L., H. Eugene, Bruce E., & Julia R., 2003)

1.5. NEUTRALIZACIÓN DE EFLUENTES DIVERSOS

Antes de su vertido al medio natural, es necesario llevar el pH a un valor conforme a la reglamentación en vigor en:

- Vertidos industriales ácidos o alcalinos;
- Aguas ácidas de achicamiento de minas.

Algunos efluentes industriales exigen asimismo una neutralización (corrección de un pH excesivamente ácido o alcalino) antes de someterse a un tratamiento posterior (biológico o físico-químico) (Degrémont, 1979, pág. 387).

Además existen desechos químicos que poseen valores residuales de ácido o base que pueden ser empleados para la neutralización en el tratamiento de desechos. Por ejemplo, el licor ácido proveniente de la industria del acero es útil tanto por su valor como ácido como por el hierro que contiene en forma de coagulante; el lodo del ablandamiento con cal-carbonato es una buena fuente de álcalis para la neutralización de desechos ácidos (Nalco Chemical Company, 1995, págs. 13-1).

1.6. POTENCIAL DE HIDRÓGENO

En la definición de Brønsted-Lowry, los ácidos y las bases están relacionados con la concentración del ión presente de hidrógeno. Los ácidos aumentan la concentración de iones de hidrógeno, mientras que las bases disminuyen la concentración de iones de hidrógeno (al aceptarlos). Por consiguiente, la acidez o alcalinidad de un líquido puede ser medida por su concentración de iones de hidrógeno (Anthony Carpi PH.D., 2003).

En 1909, el bioquímico danés Sören Sørensen inventó la escala pH para medir la acidez y alcalinidad. La escala pH está descrita en la fórmula:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

La concentración es comúnmente abreviada usando log; por consiguiente, $[\text{H}^+]$ = concentración de ión presente de hidrógeno. Cuando se mide el pH, $[\text{H}^+]$ es una unidad de moles H^+ por litro de solución. Por ejemplo, una solución con $[\text{H}^+] = 1 \times 10^{-7}$ moles/litro tiene un $\text{pH} = 7$ (una manera más simple de pensar en el pH es que es igual al exponente del H^+ de la concentración, ignorando el signo negativo).

La escala pH varía de 0 a 14. Las sustancias con un pH entre 0 y menor de 7, son ácidos; pH y $[\text{H}^+]$ están relacionados, menor pH significa mayor $[\text{H}^+]$ y un ácido más fuerte. Inversamente, las sustancias con un pH mayor a 7 hasta 14 son bases; mientras mayor es el pH más fuerte es la base. Exactamente, en $\text{pH} = 7$, están las sustancias neutras; por ejemplo, el agua pura.

La relación entre $[\text{H}^+]$ y pH está mostrada en la Tabla 3, junto a algunos ejemplos comunes de ácidos y bases de la vida cotidiana.

Tabla 3. pH aproximado de algunas soluciones

Solución	pH	Nombre
HCl 0.10 m	1.0	
Jugo gástrico	1.6 - 1.8	
Jugo de limón	2.3	
Vinagre	2.4 - 3.4	
Bebidas gaseosas	2.0 - 4.0	
Cerveza	4.0 - 4.5	
Leche	6.3 - 6.6	
Orina	5.5 - 7.5	
Agua de lluvia (no contaminada)	5.6	
Saliva	6.2 - 7.4	
Agua pura	7.0	Neutra
Sangre	7.35 - 7.45	
Clara de huevo (fresca)	7.6 - 8.0	
Bilis	7.8 - 8.6	
Leche de magnesia	10.5	
Amoniaco doméstico	11	
NaOH (lejía) 0.10 M	13	

Fuente: (Burns, 2003, pág. 490)

Cuando la neutralización, se produce entre un ácido fuerte y una base débil, el catión de la base sufre una hidrólisis produciéndose iones hidronio H_3O^+ , por lo que el pH es < 7 .

Cuando la neutralización, se produce entre una base fuerte y un ácido débil, el anión del ácido sufre una hidrólisis produciéndose iones hidróxido, OH^- por lo que el pH es > 7 .

Cuando la neutralización, se produce entre una base débil y un ácido débil, el anión del ácido sufre una hidrólisis al igual que el catión de la base, por lo que el pH es < 7 si es más débil la base, y, es > 7 si es más débil el ácido.

La elección del indicador adecuado para determinar el punto de equivalencia dependerá del pH final, que tiene que estar dentro del intervalo en el que el indicador sufre el cambio de color.

1.6.1. Régimen de acidez y alcalinidad

En la Figura 3, se presentan los diferentes regímenes de acidez y alcalinidad. Se observa que al aumentar el pH arriba de 9,6, la alcalinidad hidroxílica se vuelve medible; su concentración puede determinarse mediante un medidor de pH o calcularse la distribución entre el carbonato e hidróxido de la siguiente manera:

$$\text{CO}_3^{-2} = 2 (M - P)$$

$$\text{OH}^- = 2P - M$$

$$\text{HCO}_3^- = 0$$

M = alcalinidad total, mg/l

P = alcalinidad de la fenolftaleína, mg/l

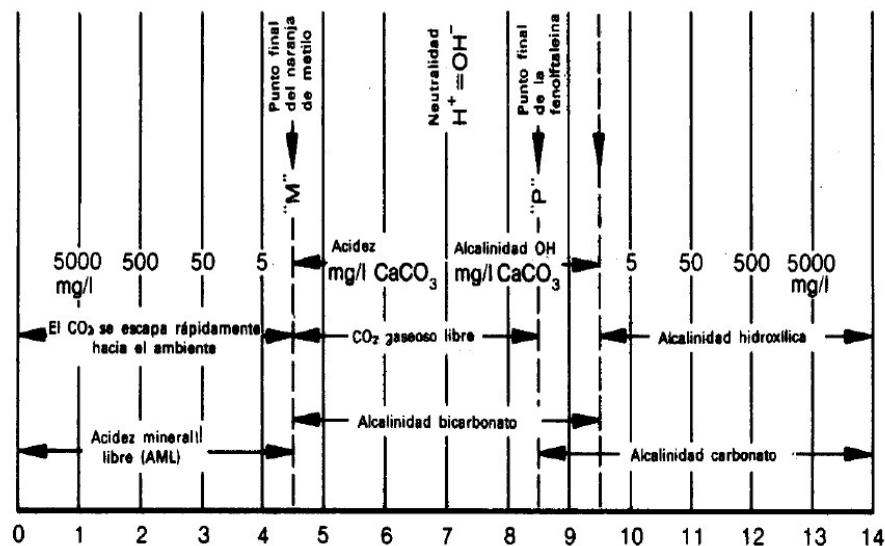


Figura 3. Acidez y diferentes tipos de alcalinidad y sus rangos
Fuente: Manual del Agua, Tomo I (Nalco Chemical Company, 1995, págs. 4-10)

Uno de los puntos críticos para neutralizar agua residual es determinar la naturaleza de los iones causantes de la acidez o alcalinidad. Esto puede realizarse construyendo en el laboratorio curvas de valoración, que muestren el tipo requerido de producto alcalino para neutralizar un efluente ácido hasta un valor determinado como se muestra en la Figura 3 (curva de valoración de un ácido) y viceversa para una agua residual alcalina, Figura 4 (curva de valoración de un álcali) (Robert A. Corbitt, 2003, págs. 6-170).

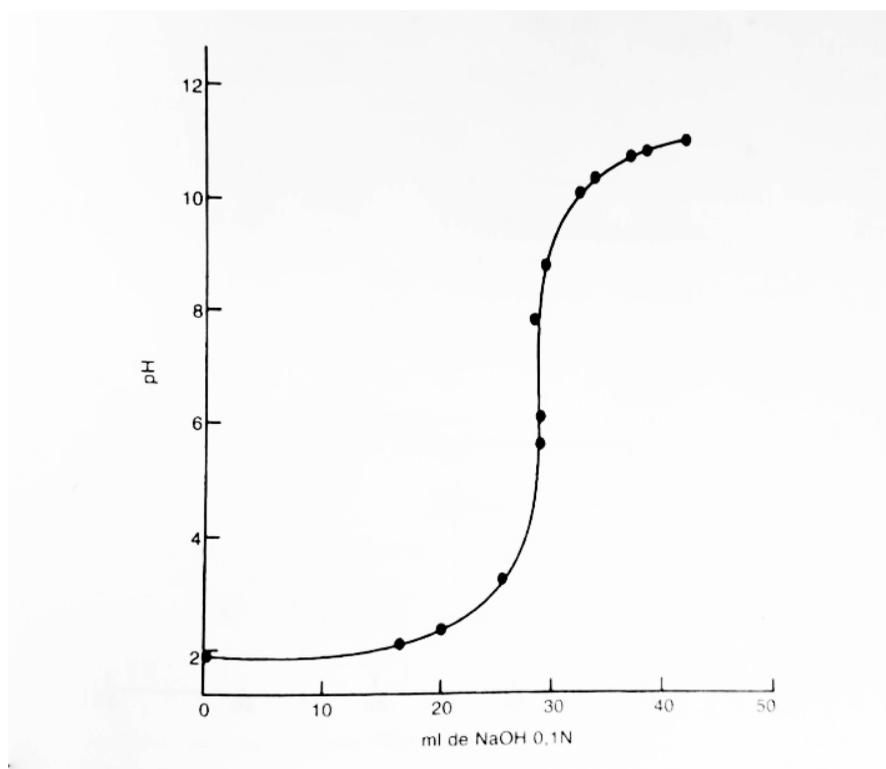


Figura 4. Curva de valoración: Neutralización de un ácido

Fuente: Manual de Referencia de la Ingeniería Ambiental, (Robert A. Corbitt, 2003, págs. 6-171)

Resulta importante tanto la cantidad del agente químico neutralizante como la pendiente de la curva de valoración. En ciertos casos, cuando el agua residual está muy tamponada muestra una variación pequeña de pH con la adición del aditivo neutralizante. En otros casos, el cambio de pH resulta significativo con la adición mínima del reactivo. Este comportamiento es crítico en el diseño del sistema cuando existe la necesidad de controlar el pH en un rango estrecho de valor, por ejemplo, ± 1 unidad de pH. En este caso, se aconseja aumentar el tiempo de residencia en una neutralización multietapa. (Robert A. Corbitt, 2003, págs. 6-172)

1.7. VALORACIÓN ÁCIDO - BASE

Una disolución ácida puede neutralizarse con otra básica (y viceversa) parcial o totalmente. La neutralización total, que lleva consigo la pérdida de las propiedades del ácido o la base por la disolución, se consigue cuando se igualan sus concentraciones de iones H_3O^+ y OH^- .

Debido a esta circunstancia, será posible determinar la cantidad desconocida del ácido o la base presente en una disolución midiendo el volumen de la base o el ácido de una disolución de concentración conocida o disolución patrón que es necesario añadir para conseguir

la neutralización. La utilización de un medidor de pH, o indicador adecuado, señalará el momento o punto final de la reacción, que se alcanza cuando el pH de la disolución toma un valor igual a siete. El proceso correspondiente recibe el nombre de análisis volumétrico o valoración ácido-base y es una técnica frecuente en los laboratorios químicos.

Los cálculos químicos para esta reacción de neutralización, se efectúan con la ayuda de la ecuación:

$$V_{\text{ácido}} * M_{\text{ácido}} * n_{\text{ácido}} = V_{\text{base}} * M_{\text{base}} * n_{\text{base}}$$

Donde V representa el volumen, M la concentración molar, que indica el número de moles de soluto por litro de solución y n el número de protones cedidos (nácido) o aceptados (nbase) por cada molécula de ácido o base, respectivamente. Dicha ecuación indica que, para alcanzar el punto final de la reacción, el número total de protones cedidos por el ácido debe ser igual al número total de protones aceptados por la base. El producto $V \cdot M$ representa, de acuerdo con la definición de molaridad, el número de moles, es la cantidad de una sustancia cuya masa, en gramos, es numéricamente igual al peso fórmula de la sustancia, el cual es proporcional al número de moléculas ($1 \text{ mol} = N_A \text{ moléculas}$, siendo N_A el número de Avogadro = $6,022 \times 10^{23}$ átomos). Luego, el producto $V \cdot M \cdot n$ es proporcional, en ambos casos, al número de protones cedidos por el ácido o aceptados por la base, según la correspondiente ecuación química, siendo la constante de proporcionalidad la misma para ambos.

En términos prácticos, n ácido coincide con el número de átomos de hidrógeno que pierde cada molécula de ácido en la reacción; y, si la base es un hidróxido, n base es igual al número de grupos OH^- de la base que reacciona con el ácido.

Con el fin de controlar cuidadosamente el volumen empleado de la solución patrón en la valoración, se utiliza una bureta que permite medir no sólo la cantidad total de disolución añadida, sino también añadir gota a gota la disolución patrón a la disolución problema o desconocida. La representación, Figura 5, de la variación del pH con la cantidad añadida de disolución patrón recibe el nombre de curva de valoración. El punto de corte de la gráfica con la línea horizontal de $\text{pH} = 7$ define el punto final de la valoración. En la Figura 4, se advierte como en el entorno de ese punto la pendiente de la gráfica, se hace muy elevada, lo que significa que cantidades pequeñas de la disolución producen cambios importantes en el pH. En tal circunstancia, la adición de disolución patrón debe efectuarse gota a gota para no sobrepasar el valor neutro del pH.

1.7.1. Sistemas de control de pH

Los sistemas de control del pH puede ser uno de los tres tipos siguientes: continuo sin control, controlado por tandas, y continuo controlado. El más simple es el primero, que consiste en hacer pasar una corriente de agua residual ácida sobre un lecho de trozos de

piedra caliza.

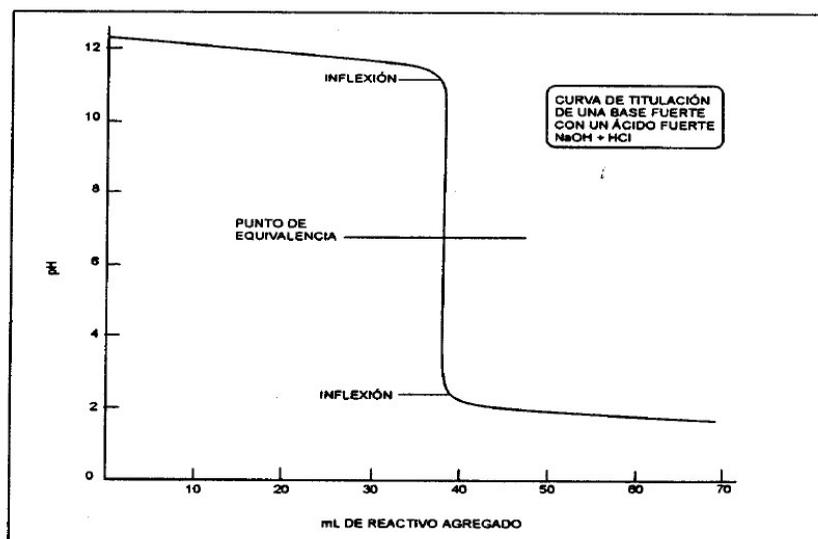


Figura 5. Curva típica de titulación de una base fuerte con un ácido fuerte
Fuente: Tratamiento de Aguas Residuales, (Romero Rojas, 2000)

El segundo método es tratar las aguas residuales por lotes. En este caso, se mide el pH, añade ácido o base, y vuelve a medir el pH hasta logra el nivel deseado y se puede descargar el agua al alcantarillado o someterla a cualquier otro tipo de tratamiento adicional que sea necesario.

El tercer método es el más avanzado para controlar el pH; es un sistema continuo con tele sensores que miden el pH y añaden los productos químicos necesarios. En este método, el sensor mide el pH y envía mensajes a un sistema de bombeo para que añada el producto químico para lograr la neutralización, y luego, se mezcla el agua residual para asegurarse que la distribución del producto químico sea homogénea.

Existen sistemas más complejos con tele sensores múltiples del pH y puntos múltiples de adición química para afinar, aún más, el proceso y obtener pH más constantes. Para que el sistema funcione correctamente es esencial mantener los electrodos limpios que tienen tendencias a obstruirse, especialmente en las aguas residuales muy corrosivas.

Al seleccionar el compuesto químico para la neutralización, se deben tener en cuenta varios factores, entre ellos:

- 1) El estado físico del compuesto químico (sólido o líquido)
- 2) El envase (a granel, sacos y tambores).

- 3) La toxicidad.
- 4) La facilidad de uso.
- 5) Los subproductos de la reacción.
- 6) La rapidez de la reacción.
- 7) La corrosividad.
- 8) El costo de los productos químicos.
- 9) Si pueden obtenerse fácilmente.
- 10) Las concentraciones operativas.
- 11) La producción del lodo residual, así como la facilidad de deshidratación y eliminación.

1.8. NEUTRALIZACIÓN DE LAS AGUAS Y AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

1.8.1. Neutralización de las aguas ácidas

La neutralización de las aguas ácidas, se logra comúnmente agregando cal (óxido de calcio), óxido o hidróxido de magnesio e hidróxido de sodio. La cal (óxido de calcio) o su forma hidratada (hidróxido de calcio), es la más usada por su costo bajo (Freire Espín, 2012, pág. 20).

El hidróxido de sodio, aunque costoso, es una forma química muy conveniente para la neutralización de los residuos ácidos en las plantas pequeñas y para minimizar la cantidad producida de lodo. Se presenta en estado líquido en concentración del 50%-NaOH, la cual inicia su cristalización a 12°C y en concentración del 73%-NaOH, que empieza su cristalización a 73°C; por esto, requiere almacenamiento apropiado y dilución adecuada antes de usarlo.

También, se consiguen sustancias como óxido de calcio y magnesio, en estado sólido, polvo o granulado, en concentración del 100%. Durante su preparación, se debe tener especial cuidado en escoger la tasa de dilución, y además, el método de enfriamiento se debe controlar apropiadamente, para que no salpique o haya ebullición.

1.8.2. Neutralización de las aguas alcalinas

Para la neutralización de las aguas alcalinas, se agregan, comúnmente, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y anhídrido carbónico (en plantas donde hay disponibilidad de dicho compuesto) (Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2015).

El ácido sulfúrico (H_2SO_4) es el más económico y usado; es fuertemente corrosivo, denso, aceitoso, color carmelita claro u oscuro, según su pureza; debe estar libre de metales pesados y se consigue en concentraciones del 60 al 94%- H_2SO_4 ; diluido es extremadamente corrosivo.

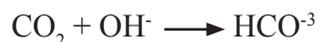
El ácido clorhídrico o muriático es un líquido de color claro, amarillo o irritante. Es venenoso, puede contener hierro o arsénico, y se consigue en concentraciones hasta del 35%-HCl (grado reactivo).

En la neutralización de los residuos líquidos alcalinos, también llamados básicos, se puede utilizar cualquier ácido fuerte. Por consideraciones prácticas, la elección, se limita a considerar el ácido sulfúrico (en la máxima dosis tolerable sin exceder la norma de descarga para sulfatos) y el ácido clorhídrico (para completar la neutralización). La reacción es prácticamente instantánea, pero el grado de mezcla no es instantáneo.

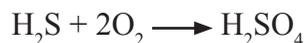
Si se disponen gases de combustión como el CO_2 , en el orden del 14% o más, se lo puede burbujear en la solución alcalina. El CO_2 establece un equilibrio con el ácido carbónico, HCO^{-3} cuya capacidad ácida, se utiliza para neutralizar la carga alcalina. La reacción es -naturalmente- más lenta que la de los ácidos fuertes, en fase líquida, pero de mucho menor costo y aporta -aunque mínimamente- al abatimiento de la carga atmosférica de los gases de invernadero. El ácido sulfúrico es el más usado, aunque por costo y disponibilidad, se prefiere el clorhídrico. El uso del ácido nítrico es más restringido para evitar la concentración de nutrientes. Las concentraciones comerciales son generalmente de 93,19% para el ácido sulfúrico, 31,45% para el ácido clorhídrico y 67,2% para el ácido nítrico. Sin embargo, en el tratamiento de las aguas, se usan en diferentes concentraciones.

Cuando se ajusta el pH de un residuo, para el tratamiento biológico posterior; la actividad biológica puede introducir cambios de pH en el residuo, por mecanismos diferentes. Por ejemplo, las reacciones siguientes producen disminución de pH:

1) Destrucción de la alcalinidad por producción del CO_2 :



2) Oxidación de compuestos de azufre en ácido sulfúrico:



3) Nitrificación:



4) Producción de ácidos orgánicos: La oxidación bioquímica de los ácidos orgánicos y la destrucción de las sales de los ácidos orgánicos aumentan el pH en los reactores biológicos. Además, la adición de cal para la neutralización, como tratamiento, puede incrementar, al combinarse con el CO_2 de la actividad biológica, la dureza en el efluente y formación de precipitados de CaCO_3 , si se combina con aguas alcalinas.

1.9. AJUSTE DEL pH PARA LA ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS

Muchos de los procesos de tratamiento de las aguas residuales industriales necesitan el ajuste del pH y, por consiguiente, el efluente requiere la neutralización. En el decapado del hierro y la industria de la galvanoplastia, se usan ácidos y sustancias cáusticas que producen residuos con metales pesados como cromo, zinc, cobre, hierro, níquel, estaño y cianuro.

La precipitación de dichos metales hace necesaria la modificación del pH del residuo y la aplicación posterior de un proceso de neutralización. En la figura 8 se ilustra la solubilidad de varios metales en función del pH e indica cómo para residuos mezclados es difícil definir el pH mejor, pues cada metal tiene diferente pH óptimo para su precipitación.

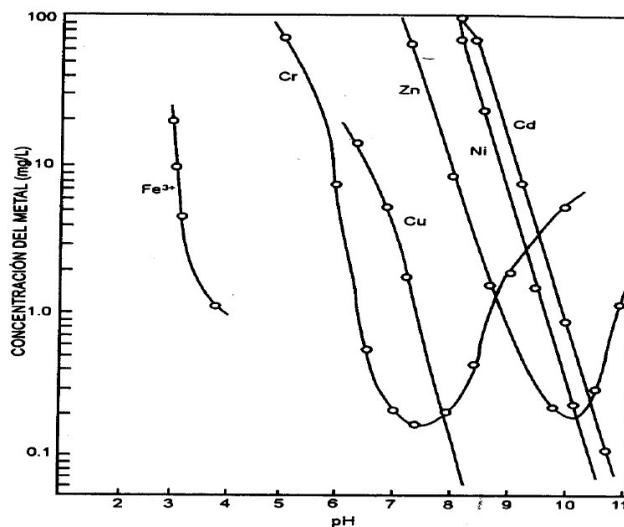


Figura 8. Solubilidad de los metales en función del pH
Fuente: Jairo Romero Rojas, Tratamiento de aguas residuales.
Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia, 2001

1.10. MÉTODOS PARA NEUTRALIZAR RESIDUOS LÍQUIDOS INDUSTRIALES

La neutralización puede hacerse por los siguientes métodos:

- 1) Homogeneización, que consiste en mezclar las corrientes ácidas y alcalinas, disponibles en una planta. Se utilizan tanques de homogeneización de nivel constante o variable.
- 2) Control directo del pH, que consiste en la adición de ácidos o bases para neutralizar las corrientes alcalinas o ácidas, respectivamente. A continuación, algunos comentarios de la neutralización de este tipo:
 - a) Neutralización de residuos líquidos ácidos con cal en tanques de mezcla completa. La lechada de cal, se usa en concentraciones del 8 al 15% de cal viva. Se usan procesos discontinuos para caudales menores de 400 m³/d. (Tratamiento de Aguas Residuales, Jairo Romero Rojas, pág. 329). En procesos de flujo continuo, el control del pH es automático; si se usa aire para mezcla, se recomienda una tasa de 0,3 a 0,9 m³/min.m² para tanques de 3 m de profundidad.
 - b) La neutralización de residuos líquidos ácidos, con lechos de piedra caliza, de flujo ascensional, preferentemente, admite cargas hidráulicas mayores de 80 m³/m²d que impide el taponamiento; con cargas menores pierde fuerza y termina taponando; en cambio, la carga hidráulica en lechos de flujo en descenso, se limita a 60 m³/m²d para asegurar un tiempo apropiado de contacto; con estos flujos en descenso, el objetivo es que haya una mejor neutralización.
 - c) La concentración del ácido, se limita a 0,6%-H₂SO₄ para evitar el recubrimiento de la caliza con CaSO₄ y el desprendimiento excesivo de CO₂. Con lechos de caliza dolomítica, se requiere mayor tiempo de contacto.
 - d) En lechos de flujo ascensional, se puede aumentar la carga hidráulica.
 - e) Neutralización de residuos ácidos con diferentes sustancias alcalinas como NaOH al 50%, Na₂CO₃ o NH₄OH. El carbonato de sodio comercial, se consigue generalmente en fundas o sacos de 50 kg al 99,2%-Na₂CO₃ ó 58%-Na₂O.

1.11. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA NEUTRALIZACIÓN

Cualquiera que sea el método de neutralización es importante tener en cuenta la influencia de los siguientes factores:

- 1) La homogenización al máximo posible del caudal y pH del afluente al proceso de neutralización.
- 2) El desarrollo de curvas de titulación para el afluente, que permitan un diseño y una operación apropiados del proceso de neutralización.
- 3) La caracterización cuantitativa y cualitativamente del lodo o residuo del proceso de neutralización.
- 4) La determinación del grado de mezcla y nivel de potencia más apropiados en el tanque de neutralización.
- 5) La determinación del efecto agregado del compuesto químico, durante el proceso de neutralización, sobre la calidad del efluente y cualquier método ulterior de tratamiento.
- 6) El desarrollo de un sistema efectivo de control del proceso de neutralización.

La cal, se compra en forma de cal viva (CaO) y como hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. La densidad es aproximadamente de 880 a 1.200 kg/m^3 . La adición de cal al agua crea condiciones para precipitar CaCO_3 , al elevar el pH sobre 10,5; se forma $\text{Mg}(\text{OH})_2$ que actúa como coagulante, cuando hay magnesio. La cal, para dosificarla, debe convertirse previamente a suspensión.

1.12. REACTIVOS UTILIZADOS EN LA NEUTRALIZACIÓN

Existen muchos reactivos de características ácidas y alcalinas; sin embargo, no todos se deben emplear en la neutralización, por lo que, se ha elaborado la Tabla 1, tomando información de algunas fuentes bibliográficas.

Tabla 1. *Productos químicos utilizados con frecuencia en la neutralización*

NOMBRE QUÍMICO	SÍMBOLO QUÍMICO	NOMBRE COMÚN	UTILIZACIÓN
Ácido clorhídrico	HCl	Ácido muriático	Regenerante catiónico, Neutralización
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	Aceite deovitriolo, vitriolo, óleo = 66 Be	Regenerante catiónico, Neutralización
Carbonato de calcio	CaCO ₃	Calcita, piedra caliza, yeso blanco, mármol triturado.	Neutralización
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃	Ceniza de sosa (sal de sosa)	Neutralización
Dióxido de carbono	CO ₂		Estabilización Neutralización
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	Cal hidratada, cal apagada.	Estabilización Neutralización
Hidróxido de sodio	NaOH	Soda cáustica, lejía, lejía de sosa.	Regeneración de resina aniónica, neutralización
Óxido de calcio	CaO	Cal química, cal viva, cal quemada.	Ablandamiento Neutralización
Carbonato de calcio - carbonato de magnesio	CaCO ₃ -- MgCO ₃	Dolomita	Neutralización
Carbonato de calcio fina 2-9 mm	CaCO ₃	Piedra caliza	Construcción, Neutralización
Carbonato de calcio gruesa 2-12 mm	CaCO ₃	Piedra caliza	Construcción, Neutralización

Fuente: Recopilación de datos de diferentes autores como; Metcalf y Eddy, Jairo Romero, Ramalho, entre otros.

1.12.1. Carbonato de calcio en la forma de roca caliza

1.12.1.1. Composición

Desde el punto de vista químico, la caliza está compuesta básicamente de carbonato de calcio, CaCO_3 , de 92,8 a 95,5%, carbonato de magnesio, MgCO_3 , en un porcentaje menor, y pequeñas cantidades de impurezas. Aunque estos carbonatos, se encuentran presentes en muchas otras rocas, minerales y suelos, en su más amplia definición, la roca caliza, se distingue por un contenido total de más del 50% de carbonatos.

Los carbonatos constituyen un grupo mineralógico importante por su variedad, y la abundancia de determinados minerales del grupo, como la calcita o dolomita, que constituyen las calizas y dolomitas, respectivamente. Presentan, además, aplicaciones variadas, sobre la base de:

- 1) Su abundancia y el costo bajo de su extracción minera;
- 2) La reacción con los ácidos y otros compuestos químicos, como la sílice (dando origen al cemento) y el dióxido de azufre (dando origen a yeso/anhidrita); y
- 3) Su descomposición térmica, se produce a temperatura relativamente baja (del orden de los 600°C) dando origen a la denominada cal viva (CaO) o a la cal dolomítica ($\text{CaO}+\text{MgO}$), que a su vez tiene aplicaciones importantes; dentro del campo medioambiental; las calizas tienen fundamentalmente aplicaciones, en los procesos de desulfuración se liberan los gases de combustión durante las operaciones metalúrgicas, en los que, a menudo, se producen óxidos gaseosos de azufre que escapan al ambiente, dando origen al fenómeno de la lluvia ácida. La presencia de la caliza en el medio de combustión, lecho fluidizado, o como aditivo, impide la formación de estos compuestos; a continuación se representa la reacción que tiene lugar:



La adición de caliza a los suelos origina los siguientes procesos:

- 1) Neutralización de la acidez;
- 2) Incremento de la saturación del suelo, con bases de calcio, es decir, sustancia que produce iones hidróxido en solución;
- 3) Cambios en la cantidad de cationes básicos, absorbidos y disueltos;
- 4) Incremento del pH del suelo, lo cual afecta además a la solubilidad de varios compuestos;

- 5) Inactivación de las concentraciones tóxicas de Al, Mn y otras sustancias;
- 6) La fijación del nitrógeno y mineralización aumentan, al incrementarse el pH y la saturación con bases, iones hidróxido en solución;
- 7) La concentración de electrolitos aumenta con la disolución de la caliza.

A continuación, se presentan las figuras 6 y 7



Figura 6. Canteras ricas en piedra caliza

Fuente: <http://3.bp.blogspot.com/-mMsHwU8hbsU/U6vxtFPHzvI/AAAAAAAAABH0/txZQ4PypAcU/s1600/15.JPG>



Figura 7. Roca caliza

Fuente: <http://www.carbonatocalcico.es/wp-content/uploads/2012/11/caliza-comun2.jpg>

1.12.1.2. Clasificación de la caliza

La caliza puede clasificarse según su origen, composición química, textura de la roca y formaciones geológicas.

1.12.1.3. Características

La característica química más importante de la roca caliza es que a temperatura alta, se descompone químicamente en óxido de calcio (CaO), presentándose una descarbonatación a través de la expulsión del gas dióxido de carbono. Este producto, conocido como cal viva, puede hidratarse o apagarse para formar la cal hidratada (hidróxido de calcio, Ca(OH)_2) combinándose químicamente el agua con el óxido de calcio en una proporción equimolecular.

1.12.1.4. Propiedades de las rocas

Las propiedades químicas y físicas de la roca varían debido a la naturaleza y cantidad de impurezas y textura (cristalinidad y densidad). Estos factores ejercen un efecto medido en las propiedades de la cal derivado de los diversos tipos de roca. Además, los métodos para la calcinación e hidratación pueden influir profundamente en las propiedades de la caliza; por lo tanto, muchas de estas características asumen un rango de valores.

De acuerdo a las siguientes definiciones:

- 1) **Color.-** Las formas más puras de calcita y magnesia son blancas, muy a menudo con un matiz opaco; pero, la roca caliza más común hasta los tipos relativamente puros son grises o café claro.
- 2) **Olor .-** Excepto las especies carbonáceas superiores, la mayoría de las rocas calizas son inodoras.
- 3) **Textura .-** Todas las rocas calizas son cristalinas, pero hay una gran variedad en tamaño, uniformidad y disposición de las redes cristalinas. La cal hidratada es invariablemente polvo blanco, esponjoso con tamaño de partícula de una micra de diámetro o inferior a esta.
- 4) **Dureza .-** La escala de dureza Mohs, la desarrolló Friedrich Mohs, se mide del 1 al 10. Los minerales más suaves tienen números bajos y los más duros más elevados. La calcita tiene dureza de 3 en escala de Mohs. La mayor parte de las rocas de caliza es tan suave que se puede marcar fácilmente con un cuchillo.

A continuación, la escala numérica de Mohs. Ejemplo de minerales:

Tabla 2. *Escala numérica de Mosh*

Escala Numérica de Mohs	
Escala	Minerales
1	Talco
2	Yeso
3	Calcita
4	Flúor
5	Apatita
6	Ortosa
7	Quarzo
8	Topáz
9	Corindón
10	Diamante

Fuente: <http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/geology/mohs.sp.html>.

5) Resistencia .- La resistencia a la compresión varía de 8,3 a 196 MPa (1.200 a 28.400 lbf/plg²). El mármol tiene el valor más alto, y la creta y marga calcárea el menor.

6) Temperaturas de fusión y ebullición .- Las rocas de caliza se transforman a un óxido antes de que se presente la fusión; la temperatura única de fusión es aplicable a la cal viva; estos valores son:

- a) Temperatura de fusión
 - 2570°C para el óxido de calcio
 - 2800°C para el óxido de magnesio

- b) Temperatura de ebullición
 - 2850°C para el óxido de calcio
 - 3600°C para el óxido de magnesio

1.12.1.5. Impacto ambiental

El principal impacto ambiental en la producción de óxido de calcio, es la generación de polvo, siendo la medida de mitigación apropiada el control del polvo, para lo cual se requiere atrapar las emisiones de partículas en los puntos de origen y suprimir las fugas del polvo en las zonas de generación.

1.12.1.6. Características técnicas

Las calizas son rocas sedimentarias que contienen, por lo menos, 50% de carbonatos en la calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaCO}_3 - \text{MgCO}_3$), predominando la primera. Cuando prevalece la dolomita, se denomina dolomía. La caliza es aglomerante, neutralizante, escorificante y fundente.

La caliza es un carbonato de calcio de pureza alta, cuya composición química típica, a base seca, se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición química base de la caliza.

Elemento	Composición Química	%
Carbonato de calcio	CaCO_3	92,80 a 95,50
Cal	CaO	52,00 a 55,00
Sílice	SiO_2	1,00 a 2,50
Alúmina	Al_2O_3	0,50 a 1,00
Hierro	Fe	0,50 a 1,00
Óxido de magnesio	MgO	0,70 a 0,90
Fósforo	P	0,02 a 0,03
Azufre	S	0,02 a 0,03

Fuente: [http://minería/órgano informativo del instituto de ingenieros de minas del Perú.](http://minería/órgano_informativo_del_instituto_de_ingenieros_de_minas_del_peru)

1.12.1.7. Variedades comerciales

Molido.- El carbonato de calcio molido es el compuesto químico, de fórmula CaCO_3 , obtenido por la molienda de la roca caliza.

Precipitado .- El carbonato de calcio precipitado es el compuesto químico de fórmula CaCO_3 , obtenido por la precipitación del calcio en forma de carbonato. Tiene menos impurezas, más brillo y morfología controlada; es usado como relleno y extensor en plástico, pintura, papel y adhesivos, así como en productos para la aplicación en alimentos e industrias. Otras aplicaciones: recubrimientos y elastómeros.

El proceso para obtenerlo, se denomina carbonatación: La forma más común para obtener carbonato de calcio precipitado consiste en pasar CO₂ en forma de gas a una solución de lechada de cal, realizándose las siguientes reacciones químicas:

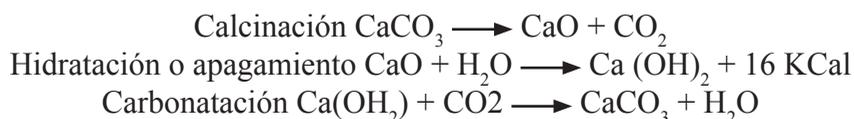


Tabla 4. Usos del carbonato de calcio

1 Farmacéutica	2 Pintura
3 Cosméticos y artículos de aseo	4 Plástico
5 Cerámica y vidrio	6 Hule
7 Alimentos	8 Otros
9 Papel	

Fuente: [http://minería/órgano informativo del instituto de ingenieros de minas del Perú](http://minería/órgano_informativo_del_instituto_de_ingenieros_de_minas_del_perú).

1.12.1.8. Producto de la caliza

Dentro de los productos más importantes de la caliza, se encuentran los siguientes: cal, carbonato de calcio y cemento. A continuación, se hará una descripción de cada uno de ellos.

CAL

Se obtiene calcinando la piedra caliza a 600°C por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio. En ese estado, se denomina cal viva (óxido de calcio); y si se apaga sometiéndola a la adición de agua, se le llama cal apagada (hidróxido de calcio).

- **Cal viva:** Material obtenido de la calcinación de la caliza que al desprender anhídrido carbónico, se transforma en óxido de calcio. La cal viva debe ser capaz de combinarse con el agua, para transformarse de óxido a hidróxido y una vez apagada (hidratada), se aplique en la construcción, principalmente en la elaboración del mortero de albañilería.
- **Cal hidratada:** Se conoce con el nombre comercial de cal hidratada a la especie química de hidróxido de calcio, que es la combinación de óxido de calcio y agua.
- **Cal hidráulica:** Cal compuesta principalmente de hidróxido de calcio [Ca(OH)₂], sílica (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃) o mezclas sintéticas de composición similar. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso debajo del agua.

En la Figura 8, se aprecian los porcentajes de las variedades de cal que se pueden producir.

Observando que la cal apagada es la que se encuentra en más alto porcentaje, esto es con el 73,2%; le sigue la cal hidráulica con un 17,9% y luego la cal viva con 8,9%.

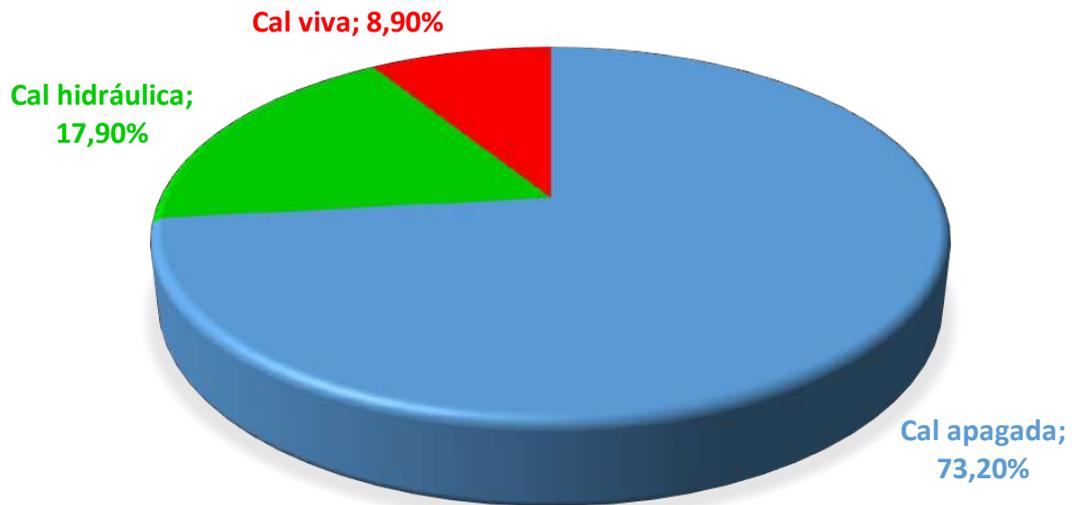


Figura 8. *Porcentaje de las variedades de cal*

Fuente: [http://minería/órgano informativo del instituto de ingenieros de minas del Perú](http://minería/órgano_informativo_del_instituto_de_ingenieros_de_minas_del_peru).

La Tabla 5 presenta los precios de productos químicos más comunes que se los utiliza como neutralizantes en el país y que algunos de ellos son comercializados previo permiso del CONSEP, organismo que controla todas las sustancias estupefacientes y psicotrópicas.

Tabla 5. Precios de productos químicos neutralizantes en el Ecuador.

PRODUCTOS QUÍMICOS NEUTRALIZANTES	FÓRMULA QUÍMICA	PRECIO
Hidróxido de sodio	NaOH	\$ 403,20
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃	\$ 336,00
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	\$ 79,12
Cal viva	CaO	\$ 79,12
Cal viva - dolomita	CaO MgO	\$ 79,12
Carbonato de calcio 2-9 mm	Piedra caliza fina CaCO ₃	\$ 6,51
Carbonato de calcio 2-12 mm	Piedra caliza gruesa CaCO ₃	\$ 6,51
Cal hidratada Grado alimenticio	Ca(OH) ₂	\$ 2688,00
Ácido clorhídrico	HCL	\$ 224,00

Fuente: Calcáreos Huayco, Solvesa, Quimipac. Penta Química. Ecuador.



CAPÍTULO II

APLICACIONES TECNOLÓGICAS

2. APLICACIONES TECNOLÓGICAS

2.1. RUTAS TECNOLÓGICAS APLICABLES PARA EL TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE

El diagrama de síntesis de las operaciones y los procesos, que se encuentra a continuación, es útil para visualizar muchas rutas tecnológicas para el tratamiento de un efluente industrial. Sólo mediante un análisis exhaustivo se podrá optimizar la opción a utilizar. Además, sirve para definir una nomenclatura que si bien tiene sus raíces históricas hace muchos años, aún se suele escuchar los términos: tratamiento primario, secundario, terciario, depuración, etc. En general, es preferible clasificar los procesos de acuerdo a sus principios físico-químico (sedimentación, filtración, centrifugación, digestión, etc.).

En este trabajo, se utilizan ambas nomenclaturas y la incorporación de nuevos procesos a examinar será vista como parte de las rutas tecnológicas contenidas en el diagrama de síntesis.

En la Figura 9, se observan las diversas opciones que se aplican en el tratamiento de las aguas residuales. En la etapa inicial, se encuentran los pre tratamientos, luego, los tratamientos primarios y continúan los tratamientos secundarios y terciarios; además, se encuentran otros tratamientos avanzados aplicados específicamente para eliminar metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos que se pueden emplear también.

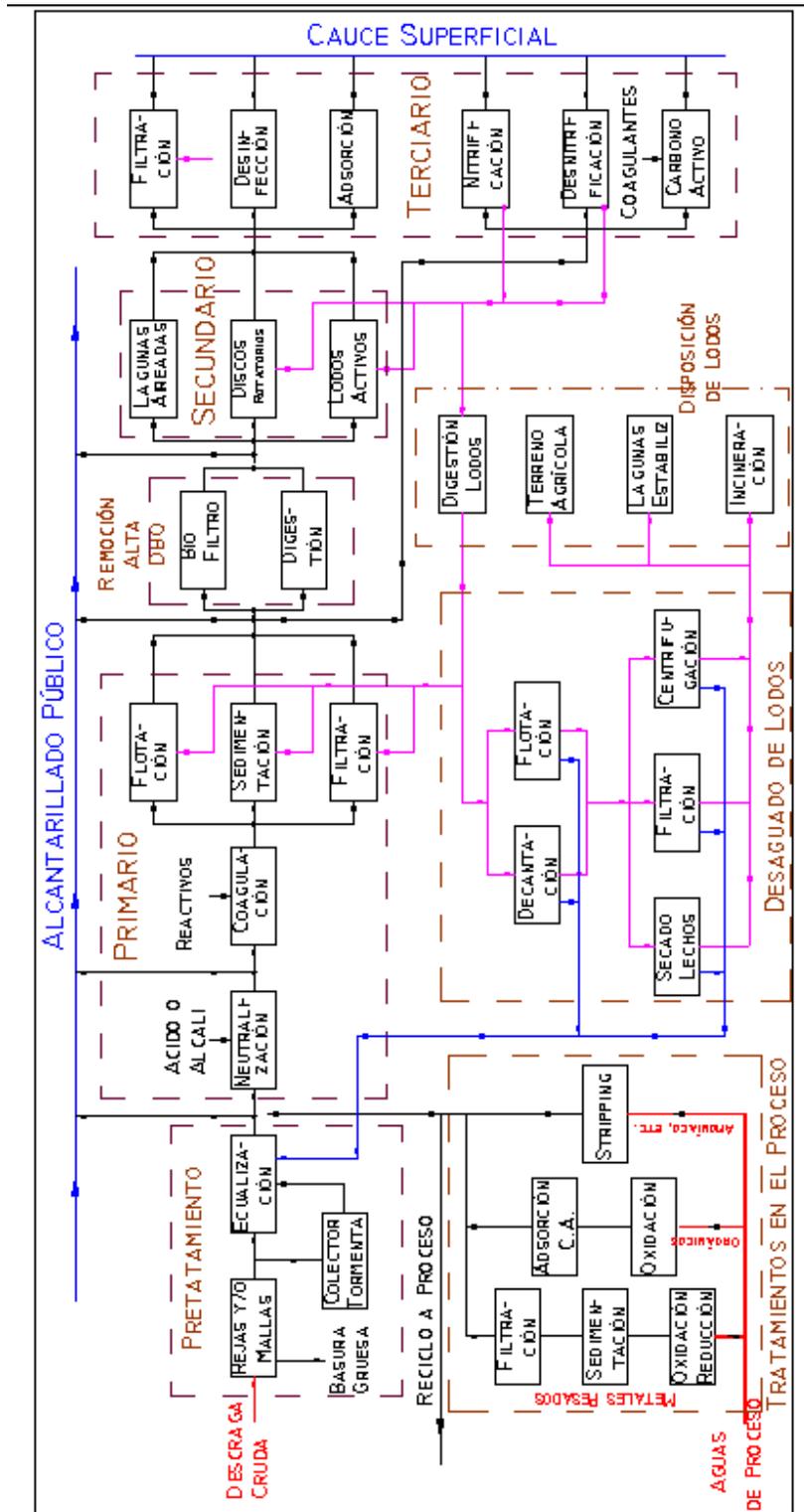


Figura 9. Diagrama de síntesis de las operaciones y los procesos convencionales que se presentan en un tratamiento de residuos industriales líquidos

Fuente: <http://www.cec.uchile.cl/~leherrer/iq651/Apunte1/Image57.gif>

2.2. PROCESOS DE NEUTRALIZACIÓN DE LOS RESIDUOS INDUSTRIALES LÍQUIDOS

2.2.1. Neutralización de las descargas industriales

Muchas descargas industriales ocurren en condiciones de acidez o alcalinidad que son incompatibles con las normas de descarga, los procesos biológicos o físicos-químicos posteriores. En particular, los sistemas biológicos requieren un pH entre 6,5 y 8,5 y, además, producen CO₂.

En los procesos biológicos por ejemplo, su operación depende de una neutralización adecuada y por lo tanto, la disminución de la DBO está relacionada con el contenido de la alcalinidad o acidez o el consumo de ácido.

2.2.1.1. Industrias que producen aguas ácidas y alcalinas

En la Tabla 6, se enumeran algunas industrias que producen aguas residuales alcalinas y ácidas.

Tabla 6. Industrias con aguas residuales ácidas o alcalinas.

Industria	Agua residual ácida	Agua residual alcalina
Aluminio	X	
Bebidas carbonatadas		X
Bronce y cobre	X	X
Café	X	
Caucho	X	X
Cervecería y destilería	X	X
Bebidas gaseosas	X	X
Curtiembres	X	X
Drenaje minas de carbón	X	
Energía	X	X
Enlatados	X	X
Explosivos	X	
Farmacéuticos	X	X
Fosfatos	X	
Hierro y acero	X	
Lavanderías comerciales		X
Limpieza de metales	X	
Papel	X	X
Pesticidas	X	
Plantas de ablandamiento		X
Plantas químicas	X	X
Refinerías de petróleo	X	X
Textiles	X	X

Fuente: Romero Rojas Jairo, Tratamiento de Aguas Residuales, Editorial Escuela Colombiana. Colombia, 2000.

Nota: Ablandamiento cal soda.

2.2.2. Procesos típicos de neutralización

Un proceso típico consiste en mezclar los efluentes ácidos y alcalinos en un homogeneizador, y disponer de alguna capacidad de retención de las cargas fuertes en ácido o álcali. Si la actividad industrial genera desechos tanto ácidos como alcalinos, se deben utilizar la acidez y alcalinidad excedentes para producir un efluente neutro.

Un aspecto importante en la determinación de la alcalinidad, se refiere al significado de la

relación AI / AP, donde AI representa la alcalinidad debida a los ácidos grasos volátiles y AP la alcalinidad bicarbonática. De acuerdo con (Rypley, Boyle, & Coverse, 1986), valores de AI /AP superiores a 0.3 indican la ocurrencia de disturbios en el proceso de digestión anaerobia; sin embargo, dependiendo del agua residual, es posible que la estabilidad del proceso ocurra para valores de AI /AP diferentes a 0.3, siendo prudente la verificación para cada caso en particular (Chernicharo, 1997).

Dependiendo de las características del agua residual a tratar, se hará necesario el ajuste del pH si éste lo requiere. Dado que las aguas residuales generadas en el proceso de extracción de almidón agrio de yuca, son de carácter ácido debido a las altas concentraciones de ácido láctico producto del proceso natural de acidificación que sufre este tipo de desecho (Arroyave, Rojas, & Torres, 1996), es fundamental la corrección del pH mediante la adición de productos químicos de tal forma que generen una capacidad de amortiguación del pH. Esta capacidad de amortiguación es denominada también capacidad buffer, la cual se refiere a la habilidad del reactor para resistir cambios en el pH, por ejemplo, la acumulación de ácidos grasos volátiles.

Estos productos químicos pueden ser diferenciados en dos grupos (Chernicharo, 1997):

- Los que ofrecen alcalinidad bicarbonática directamente (NaHCO_3 , NH_4HCO_3)
- Los que reaccionan con el gas carbónico para formar alcalinidad bicarbonática (NaOH , CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NH_3)

2.2.2.1. Neutralizar aguas alcalinas

El dióxido de carbono, en contacto con agua alcalina, toma carácter de ácido débil capaz de reaccionar con los componentes alcalinos, ocasionando su neutralización (Hincapié D. A., 2015). Una fuente importante de CO son los gases producto 2 de la combustión de combustibles fósiles (Manahan, 2004) (Never, 2000). Las desventajas presentadas por los ácidos fuertes (Gibanel, 1987) y el alto costo del CO comprimido, hacen pensar en la posibilidad 2 de emplear los gases de chimenea para la neutralización de aguas alcalinas, como alternativa a los métodos tradicionales de neutralización (Brunett & Velebil, 1976) (Sánchez & Manzano, 2002).

Los sistemas de neutralización que emplean gases de chimenea y que están basados en el contacto líquido – gas han mostrado ser técnicamente factibles y eficaces en la reducción del pH a nivel piloto, para ciertas concentraciones de CO en humos y ciertas 2 relaciones de flujo entre gas y líquido a neutralizar (Hincapié, Gallego, & Usme, 2009) (Sánchez & Manzano, 2002). En este trabajo (la neutralización de un efluente industrial alcalino empleando una sustancia gaseosa), se estudió el papel de algunas variables consideradas como las más importantes que están involucradas en este tipo de proceso, como la concentración del CO en la corriente gaseosa y las 2 relaciones gas - líquido requeridas.

2.2.2.2. Neutralizar ácidos en lechos de caliza

La caliza está en estado natural como piedra; tal nombre, se refiere al carbonato de calcio; la disolución del carbonato genera alcalinidad. Los lechos pueden ser tanto de flujo ascendente como descendente; la carga hidráulica superficial de diseño -sin información adicional de laboratorio- es del orden de los $4 \times 10^{-2} \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$; esta tasa está definida por las constantes de la caliza y el tiempo típico de residencia de neutralización de los caudales ácidos del tipo industrial.

En la Figura 10, se muestra un diagrama simplificado de un lecho de neutralización de caliza de flujo ascensional. El lecho puede tener una profundidad de caliza de 1 a 1,2 m, con una carga hidráulica de diseño de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. Diseños recientes usan lechos de flujo ascensional de 1,5 a 2,5 m de profundidad, con tanques de homogeneización para proveer cargas hidráulicas constantes de 1.200 a 1.700 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. El lecho de caliza está expuesto a problemas de taponamiento y formación de canales del flujo; sin embargo, el flujo ascensional con lechos de caliza de tamaño pequeño minimiza la formación de canales, provee mayor área superficial para mejorar la eficiencia de la neutralización y permite tiempos menores de retención. Además, el uso de una carga hidráulica mayor disminuye los riesgos de taponamiento.

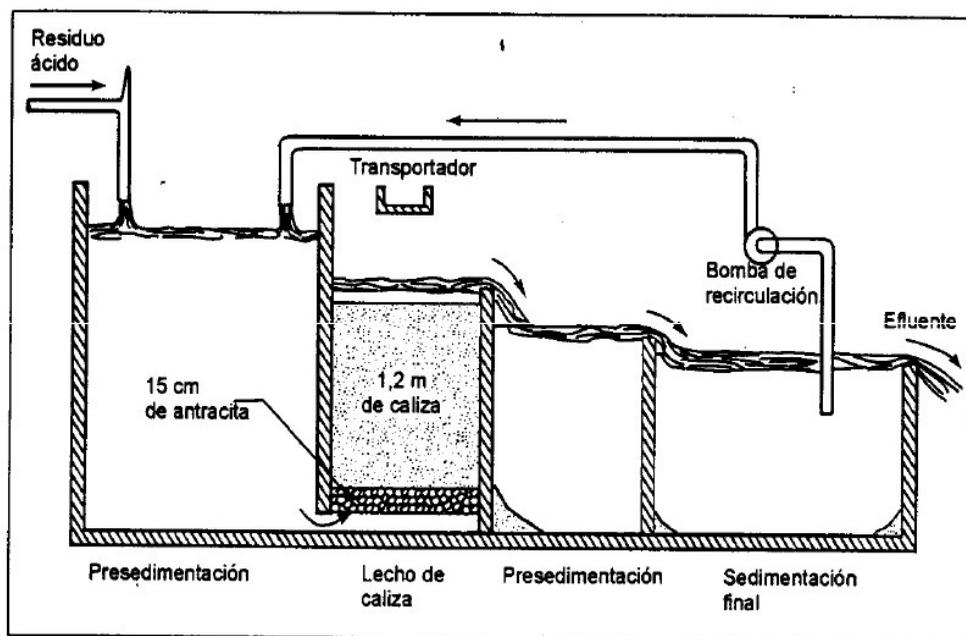


Figura 10. Diagrama de flujo de un lecho de neutralización de Caliza

Fuente: Romero Rojas Jairo, Tratamiento de Aguas Residuales,

Editorial Escuela Colombiana. Colombia, 2000.

2.2.3. Sistemas de neutralización de las aguas residuales ácidas

Se suele llamar “cal” al óxido de calcio, también citado como “cal viva” la “cal apagada” es el hidróxido de calcio. El grado de neutralización dependerá del tipo de cal utilizado. Si hay una fracción magnésica, la reacción de neutralización es muy rápida. El diseño de un sistema de neutralización depende de la curva de titulación de la cal a utilizar.

La reacción de la cal, se acelera -como muchas otras- por el calor y la agitación física. En sistemas altamente reactivos, se requieren aproximadamente diez minutos. La cal, se utiliza en los lodos con concentraciones del 8 al 15%.

En los procesos de flujo continuo, se recomiendan tasas de aplicación 0,3 a 0,9 m³/min.m² para tanques de 3 m de profundidad.

Otros agentes neutralizantes alcalinos típicos son: NaOH, Na₂CO₃ y NH₄OH. En la Figura 11, se presenta un esquema de neutralización de un agua residual ácida utilizando cal, en un sistema de etapa múltiple.

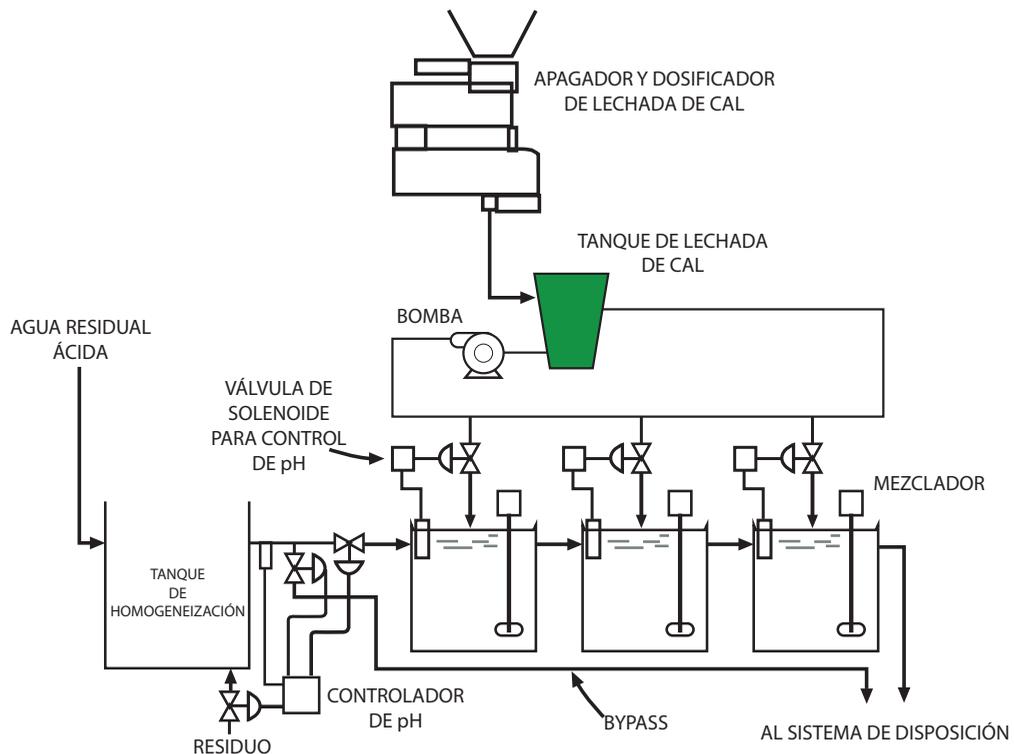


Figura 11. Esquema de un sistema de neutralización de un agua Residual ácida

Fuente: Basado en Romero Rojas Jairo, 2000.

Como un complemento a los sistemas de neutralización que se pueden emplear, se presenta a continuación, en la en la Tabla 6, algunos parámetros de diseño.

Tabla 6. *Parámetros de diseño de sistemas de neutralización .*

<ul style="list-style-type: none"> • Tanque de almacenamiento líquido: use tanque de suministro del compuesto • Tanque de disolución: use un tanque con mezcla para consumo diario
<ul style="list-style-type: none"> • Tanque de reacción: <ul style="list-style-type: none"> - profundidad igual al diámetro. - tiempo de retención de 5 a 30 min. (30 para cal) - entrada del afluente por la parte superior. - salida del efluente por el fondo
<ul style="list-style-type: none"> • Agitador: <ul style="list-style-type: none"> - de turbina para volúmenes menores de 4 m³ - de flujo axial para volúmenes mayores de 4 m³ - velocidad periférica de 3,6 m/s para tanques grandes - velocidad periférica de 7,6 m/s para volúmenes menores de 4 m³
<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de pH: preferible el sumergible sobre los de flujo directo
<ul style="list-style-type: none"> • Bomba y válvula de control: <ul style="list-style-type: none"> - las bombas tienen un rango limitado de 10:1; las válvulas tienen rangos más amplios.

Fuente: Romero Rojas Jairo, Tratamiento de Aguas Residuales, Editorial Escuela Colombiana. Colombia, 2000. Pag 331

En la Figura 12, se observa un sistema típico de neutralización con cal, el cual presenta un tanque de almacenamiento para el óxido de calcio en polvo y luego un apagador de cal; posteriormente, se ve un mezclador y un tanque de retención, en donde se produce la reacción de neutralización. Es necesario indicar que el sistema tiene accesorios como: medidor de flujo, bomba dosificadora, válvulas, conexiones, etc. Este sistema sencillo es muy utilizado para la neutralización de las aguas residuales ácidas.

Este sistema muestra que la cal para su dosificación es previamente convertida a una suspensión.

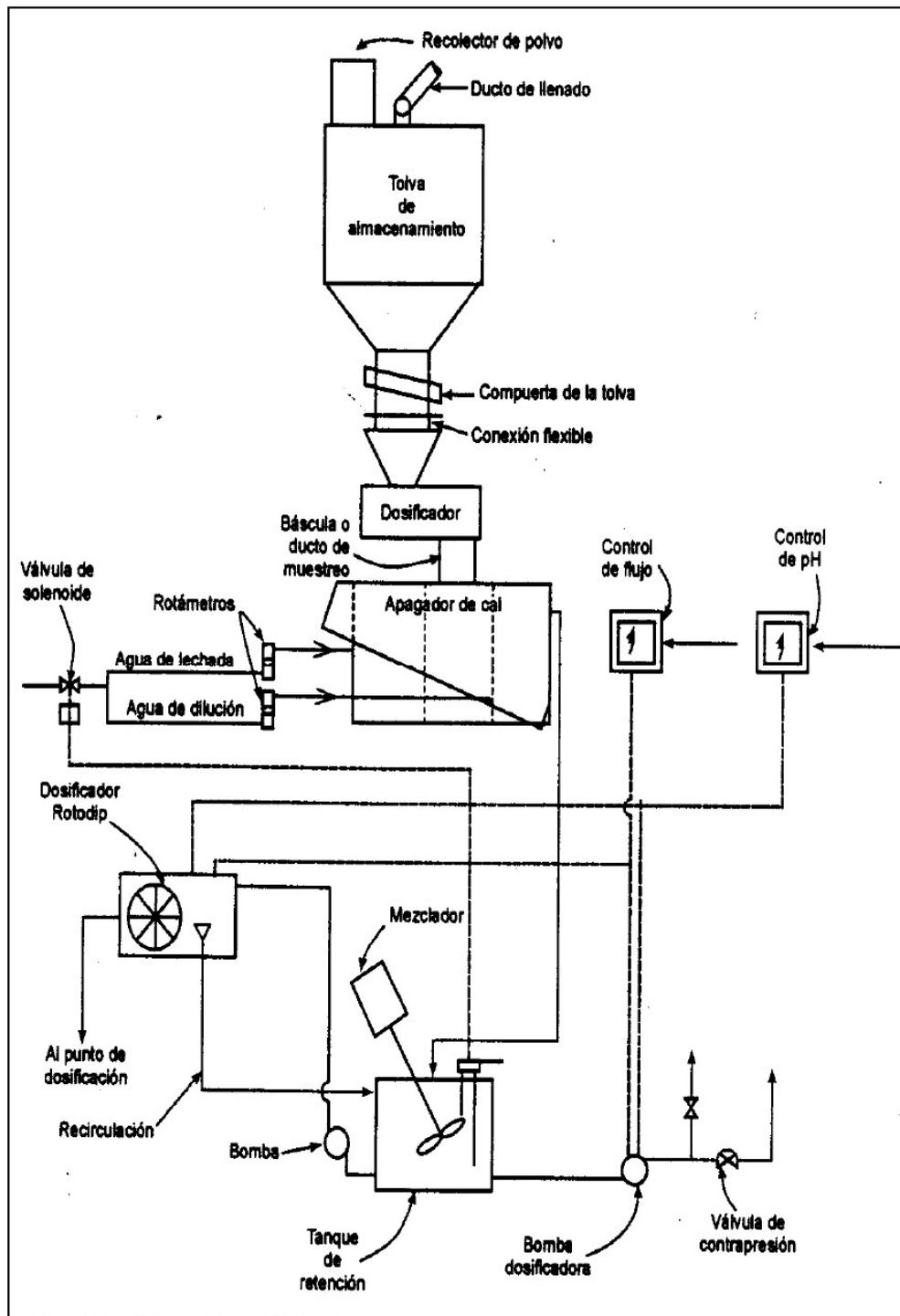


Figura 12. Sistema típico de neutralización con cal
Fuente: Romero Rojas Jairo, Tratamiento de Aguas Residuales,
Editorial Escuela Colombiana. Colombia, 2000.

Otro reactivo que constituye una buena opción en la neutralización es el hidróxido de sodio que es muy utilizado por su reacción rápida y no producir mucho lodo. En la Figura 13, se aprecia un sistema sencillo de aplicación de hidróxido de sodio en la neutralización de las aguas residuales ácidas. De igual forma que con la cal, el hidróxido de sodio debe convertirse en suspensión antes de su aplicación.

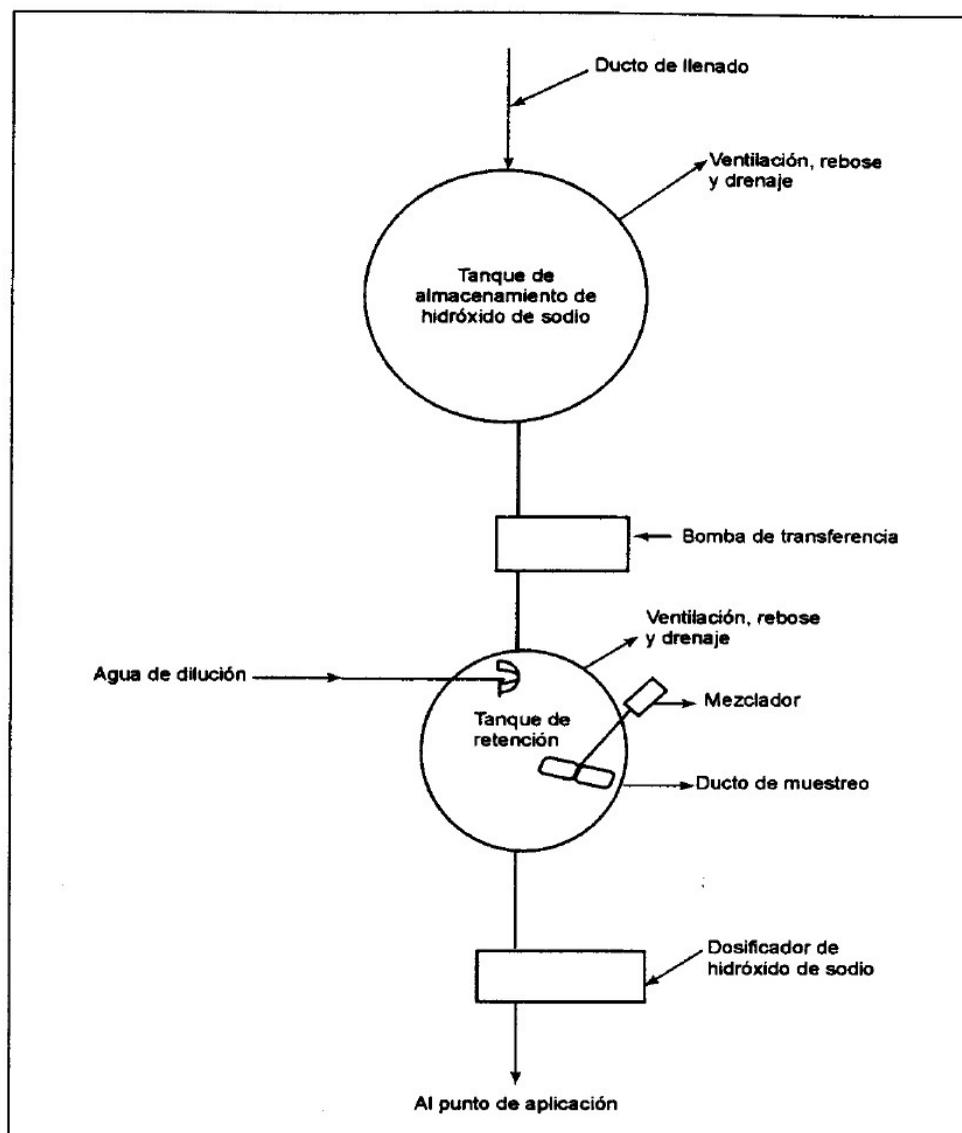


Figura 13. *Neutralización con hidróxido de sodio*
Fuente: Romero Rojas Jairo, Tratamiento de Aguas Residuales,
Editorial Escuela Colombiana. Colombia, 2000.

2.2.4. Sistemas de neutralización aplicados a drenajes ácidos de minerías

Uno de los mayores problemas de la minería es el drenaje ácido (DAM). Para su tratamiento, se pueden emplear diversas técnicas, aunque aquí, se analizan aquellas en que se emplean rocas calcáreas, como las calizas (constituidas principalmente por calcita: CaCO_3). En este caso, el carbonato de calcio actúa como un reactivo neutralizante que lleva al pH a valores aceptables y favorecen la precipitación de la mayor parte de los metales pesados que pueda contener el agua. El proceso que consume los hidrogeniones de la solución ácida, y, por lo tanto, la neutraliza, se lo resume de la siguiente manera:



Existen procedimientos industriales para conseguir dicha neutralización, entre los que destacan los siguientes:

2.2.4.1. Canales abiertos de caliza

Constituye la forma más simple de tratar el DAM y pueden ser de dos tipos: canales recubiertos de caliza a través de los cuales pasa el agua a tratar o añadir, simplemente, trozos de caliza a los canales existentes de desagüe.

El problema principal es que los bordes de caliza, se recubren de una lámina de óxidos e hidróxidos de hierro que los aíslan, reduciendo la efectividad del proceso a plazo medio-largo. Eso hace necesario utilizar grandes cantidades de caliza. Es, también, importante la impermeabilización del fondo del canal, para evitar la infiltración del DAM.

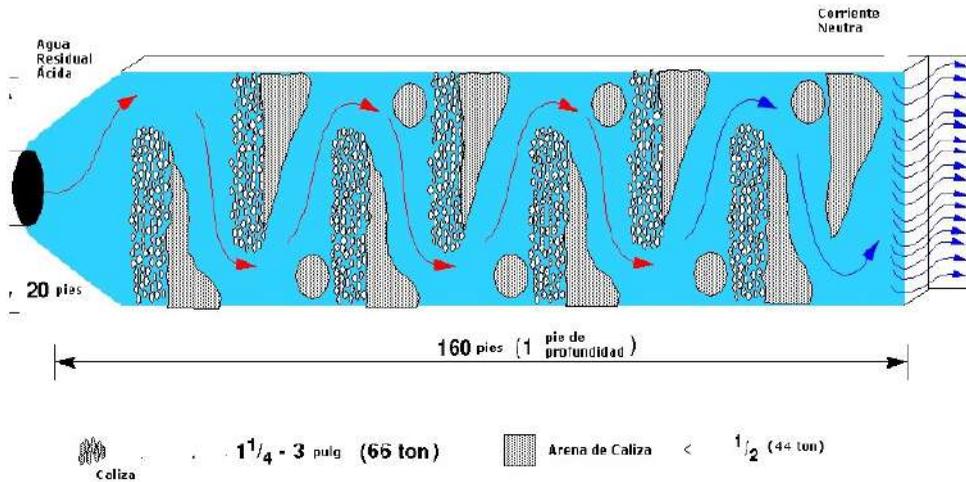


Figura 14. Sistema de canales abiertos de caliza

Fuente: <http://plataunda.cl/minas/index.html> .

En la Figura 14, el canal abierto de caliza; a la izquierda ingresa la solución ácida y por la derecha sale una corriente neutralizada.

2.2.4.2. Pozos bifurcados

Es otra forma de tratar el DAM con caliza, que se realiza en un “pozo” con circulación forzada de agua donde se acumula la caliza. La turbulencia del régimen y la presencia de las partículas finas y abrasivas dificultan la formación de revestimientos aislantes en la caliza.

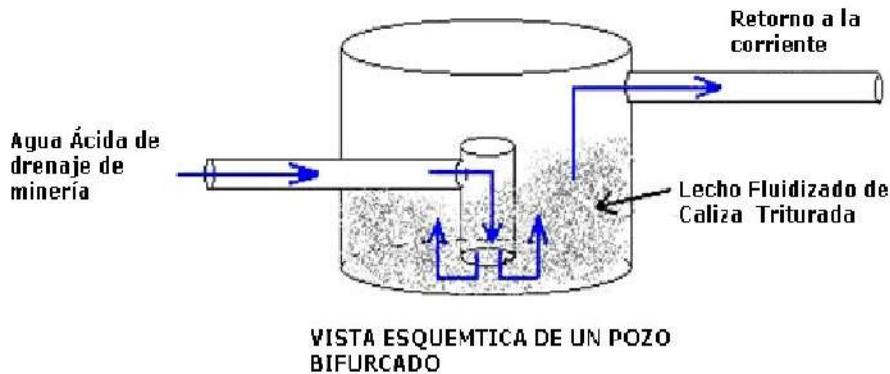


Figura 15. Sistema de pozos bifurcados

Fuente: <http://plataunda.cl/minas/index.html> .

En la Figura 15, se muestra el esquema del proceso bifurcado de pozo. Por la izquierda, ingresa la solución ácida, que reacciona con el lecho de caliza triturada, saliendo, por la derecha la solución neutralizada.

2.2.4.3. Drenaje anóxico en calizas

Es un sistema para interceptar y neutralizar los flujos subterráneos de los DAM, evitando, además, su contacto con el oxígeno atmosférico para la oxidación de los metales y, por tanto, la formación de revestimientos de óxidos de hierro en la caliza. Figura 16.

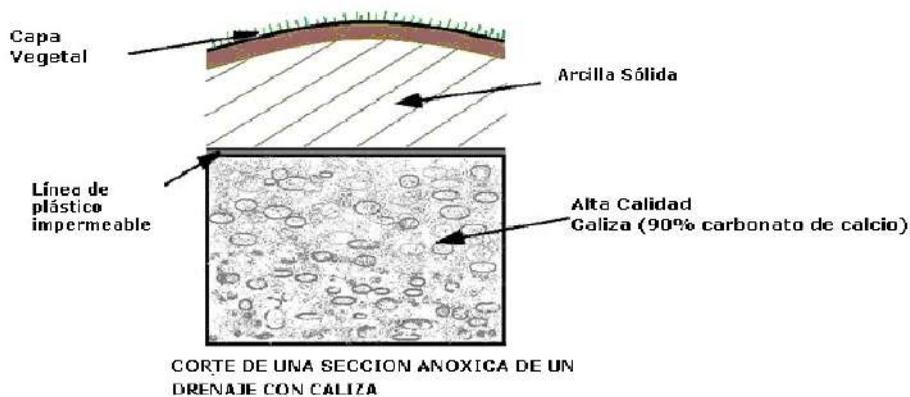


Figura 16. Sistema de drenaje anóxico

Fuente: <http://plataunda.cl/minas/index.html> .

2.2.4.4. Reactores de flujo vertical

Consisten en celdas de tratamiento con una base de caliza y un drenaje basal sobre la que se sitúa una capa de sustrato orgánico y lámina estática de agua. El agua fluye verticalmente a través del compost y la caliza; se recoge y descarga a través de un sistema de tuberías. Este sistema incrementa la alcalinidad mediante la disolución de la caliza y reducción bacteriana de los sulfatos. A continuación, se requiere un tratamiento adicional; puede ser en una laguna aeróbica para la oxidación y precipitación de los metales pesados. Figura 17.

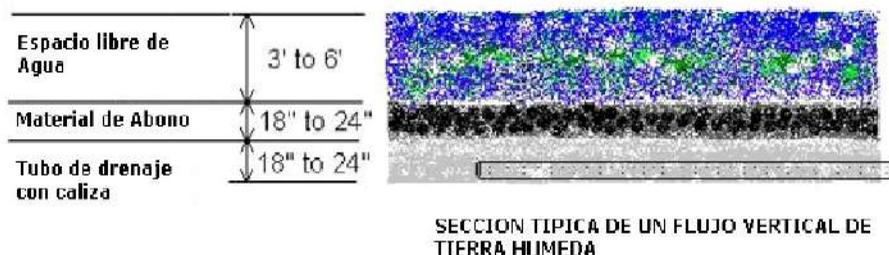


Figura 17. Sistema de flujo vertical

Fuente: <http://plataunda.cl/minas/index.html> .

2.2.5. Control del proceso de neutralización

El éxito o fracaso del proceso de neutralización radica en su control apropiado. En general, se usan los siguientes métodos:

- **Control de la dosis del reactivo:** abrir o cerrar completamente, según la señal de un electrodo de pH y el acondicionamiento de una válvula apropiada. Se usa para caudales pequeños y tiempos prolongados de retención.
- **Control proporcional:** el reactivo para la neutralización, se agrega continuamente y su dosis es proporcional al caudal y pH del afluente. Se usa para tiempos de retención menores de tres minutos.
- **Control en cascada:** usa una primera etapa con mezcla rápida intensa, y una segunda en la que la mezcla no es un factor importante. La dosis del reactivo, se controla proporcionalmente al caudal y pH del afluente. Se usa con cámaras grandes de neutralización.
- **Control adelantado:** se usa cuando el caudal y pH cambian demasiado y frecuentemente. Como variable de cambio y control de la dosis del reactivo, se usa el caudal o pH del afluente, sin esperar que el reactor experimente el cambio correspondiente de pH.

2.2.6. Control automático de la neutralización

El control del pH es difícil. Las razones, se relacionan con: la linealidad alta entre el flujo neutralizante y cambio de pH del caudal a neutralizar; el pH de un efluente industrial puede variar con reacciones cinéticas tan altas como 1 unidad de pH por minuto; el flujo puede duplicarse en unos pocos minutos una dosis pequeña de neutralizante debe mezclarse con una cantidad relativamente enorme de líquido en un lapso breve.

Normalmente, se debe recurrir a controladores a pasos (etapas). Por ejemplo, llevar primero a un pH en torno a 5 y después a 6,5 (suponiendo, por ejemplo, que se desea llegar a 6,5 desde 2,0).

La neutralización, se lleva a cabo, por lo general, en una, dos o tres etapas empleando controles, que pueden ser por retroalimentación, control hacia delante o mixto, en las figuras: 3.3, 3.4, y 3.5, se muestran ejemplos de cada una de las técnicas de control. La elección estriba en las características del afluente, tiempo de retención hidráulica del tanque de reacción, tipo de mezcla, intervalo entre reacciones y otros factores relacionados.

2.3. MATERIA PRIMA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN

La principal materia prima utilizada en este trabajo es caliza obtenida de la empresa AGREGADOS ROCAFUERTE S.A. PLANTA HUAYCO, ver anexo foto 6 y anexo cuadro 3C. Se utilizó la piedra caliza de la Planta Calcáreos Huayco, por la cercanía y facilidad de obtener piedra caliza en diferentes grados de granulometría y porque presenta las siguientes características:

Piedra caliza (piedra chispa fina 2 - 9 mm.) específica de 4 mm. Norma ASTM C-33 N^a 8.

Descripción:

Una piedra triturada compacta, muy granular y forma cúbico-angular. Se la utiliza, generalmente, para la preparación de hormigones, derivados de resistencia alta, asfaltos y neutralización. El rango granulométrico es de 2 a 9 mm, para las pruebas de 4 mm, según tabla de Distribuidora Rocafuerte.

Tabla 7. Datos para la curva granulométrica para las pruebas de 4 mm.

INEN	ASTM	% PASANTE
12,50 mm	1/2"	100
9,50 mm	3/8"	85 - 100
4,75 mm	N ^o 4	10 - 30
2,36 mm	N ^o 8	0 - 10
1,18 mm	N ^o 16	0-5

Fuente: Revista de Difusión, Planta Calcáreos Huayco. 2000.

- 1) Masa unitaria: 1.400 kg/m³
- 2) Densidad: 2.640 kg/m³
- 3) Absorción: 3%
- 4) Durabilidad: desgaste sulfato de sodio: 5%
- 5) Abrasion desgaste "Los Ángeles": 23%
- 6) Precio al público: USD \$ 6,51 TM, ver anexo cuadro 3A y 3B.

Piedra caliza (piedra chispa gruesa 2 - 12 mm) específica de 6 y 10 mm. Norma ASTM D 448 N^a 78. Figura 18.

Tabla 8. Datos para la curva granulométrica para las pruebas de 6 y 10 mm.

INEN	ASTM	% PASANTE
19,0 mm	3/4"	100
12,5 mm	1/2"	90 - 100
9,50 mm	3/8"	40 - 75
4,75 mm	Nº 4	5 - 25
2,36 mm	Nº 8	0 - 10
1,18 mm	Nº 16	0-5

Fuente: Revista de Difusión, Planta Calcáreos Huayco. 2000.

- 1) Masa unitaria: 1.400 kg/m³
- 2) Densidad: 2.640 kg/m³
- 3) Absorción: 3%
- 4) Durabilidad: desgaste sulfato de sodio: 5%
- 5) Abrasión desgaste “Los Ángeles”: 23%.
- 6) Precio al público: USD \$ 6,51 TM, ver anexo cuadro 3A y 3B.



Figura 18. Materia prima utilizada en la investigación caliza.

Fuente: Revista de Difusión, Planta Calcáreos Huayco. Ecuador, 2000.



CAPÍTULO III

**DISEÑO EXPERIMENTAL
DE UN LECHO DE FLUJO
ASCENSIONAL DE CALIZA
PARA LA NEUTRALIZACIÓN
DE RESIDUOS LÍQUIDOS ÁCIDOS**

3. DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN LECHO DE FLUJO ASCENSIONAL DE CALIZA PARA LA NEUTRALIZACIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS ÁCIDOS

3.1. ANTECEDENTES

Para diseñar un lecho de flujo ascensional de caliza utilizado en la neutralización de un residuo líquido ácido es necesario realizar una serie de pruebas experimentales, a nivel de laboratorio, en proceso “batch” o discontinuo y continuo, en columnas de laboratorio, bajo condiciones similares a la operación en escala real, lo cual permitirá determinar la altura más económica del lecho, para un valor específico de pH en el efluente, y conocer los valores óptimos de carga hidráulica, caudal, etc., siguiendo las recomendaciones dadas por los autores, Jairo Romero y Rubens Ramalho.

3.2. VARIABLES DE DISEÑO

Para la neutralización de un efluente ácido, algunos autores han establecido las condiciones y variables de diseño, para columnas a escalas, piloto y de laboratorio; mencionando, a continuación, las más importantes:

Según Jairo Romero, en la página 336 de su libro Tratamiento de Aguas Residuales, propone el procedimiento para el diseño experimental de un lecho de caliza para flujo ascensional, para la neutralización de un efluente ácido con las siguientes dimensiones:

Alturas del lecho de la caliza

0,15 m
0,30 m 0,60 m
0,90 m
1,20 m

Carga hidráulica superficial

Entre 50 y 2000 m³/m².d

Diámetro de la columna

3 a 5 pulgadas (7,62 a 12,7 cm)

En la Figura 19, se ilustra la columna experimental con lechos de caliza a utilizar.

Rubens Ramalho, en la página 172 de su libro Tratamiento de Aguas Residuales; considera el procedimiento recomendado por Eckenfelder y Ford, para los datos básicos del diseño, siendo los siguientes:

Alturas del lecho de la caliza

0,30 m

0,60 m 0,90 m 1,20 m 1,50 m

Carga hidráulica superficial

Entre 2 y 40 m³ /m².h (48 y 960 m³/m².d)

Diámetro de la columna

15 cm

El flujo ascensional es propuesto por los dos libros, porque minimiza la formación de canales de flujo, provee mayor eficiencia de la neutralización y permite menores tiempos de retención.

3.3. FUNDAMENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS DE NEUTRALIZACIÓN

Considerando los parámetros sugeridos en el numeral 3.2, por distintos autores, y con base a la disponibilidad de materiales y el grado de dificultad de construcción de las columnas, se decidió por dimensiones que estén dentro de los parámetros recomendados, siendo los siguientes:

Número de columnas: 4

Diámetro de las columnas: 10 cm

Altura de las columnas: 50 cm

Material de las columnas: acrílico

Espesor de las columnas: 4 mm

Profundidad de lecho de caliza: 0,30, 0,60, 0,90 y 1,20 m

Carga hidráulica superficial: 96 a 912 m³/m².d

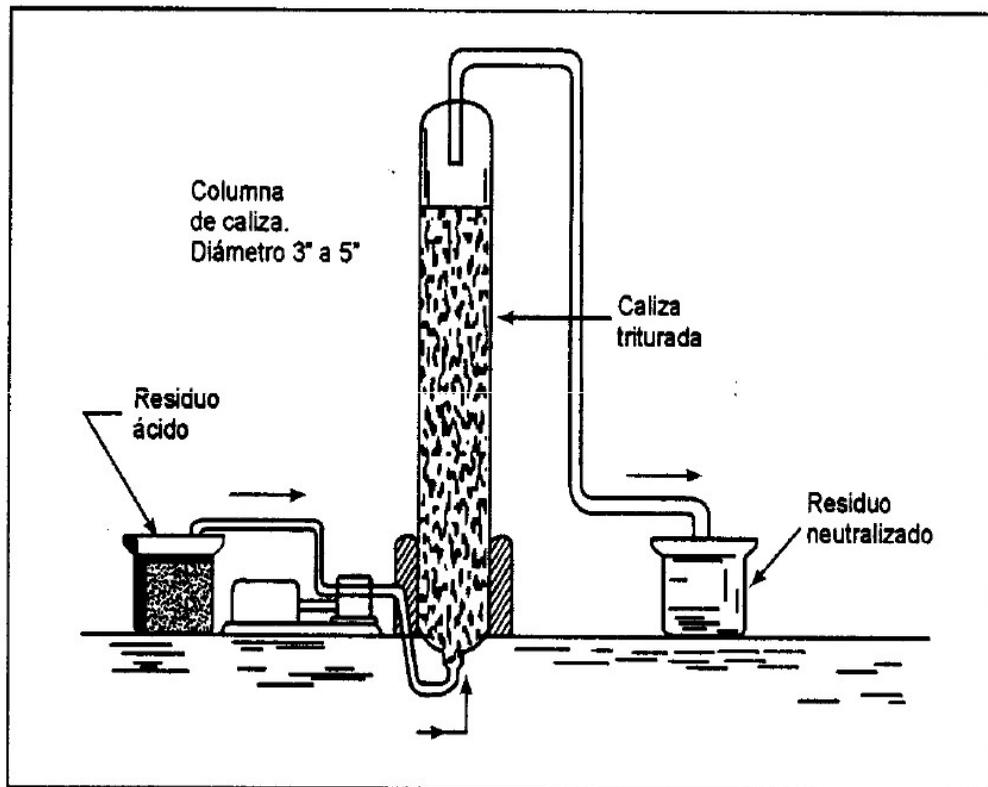


Figura 19. *Columna experimental con lechos de caliza.*
Fuente: Romero Rojas Jairo. Tratamiento de Aguas Residuales.
Editorial Escuela Colombiana. Colombia, 2000.

3.4. CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS

3.4.1. Diagrama del equipo

Con base a las variables indicadas de diseño, se elaboró el diagrama del equipo utilizado en la investigación.

A continuación se observa la Figura 20 en la cual se presenta el diagrama del equipo.

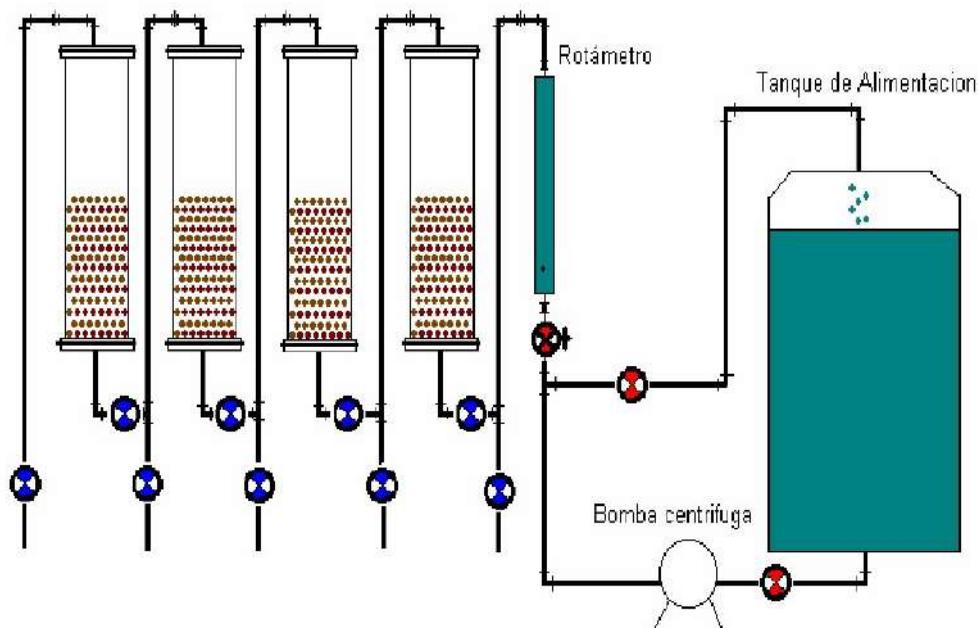


Figura 20. Diagrama del equipo.
Fuente: Elaboración propia.

El equipo de neutralización con lechos de caliza, consta de los siguientes componentes:

- Cuatro columnas de acrílico de 10 cm de diámetro, con una altura de 50 cm, cada una, con bridas en sus extremos para su instalación fácil.
- Un tanque de plástico de 55 galones, reservorio usado del agua residual a tratar.
- Una bomba centrífuga de $\frac{1}{2}$ Hp, para el bombeo del agua residual desde el tanque de almacenamiento, a través de los lechos de caliza.
- Un sistema de control manual, para el encendido de la bomba.
- Un rotámetro con escala 43 a 290 l/h
- Distintos accesorios como: codos, nudos, neplos, válvulas, etc.

En la Figura 21, se observa el equipo construido, con base a los datos de diseño para realizar las pruebas experimentales para el diseño de unidades industriales.



Figura 21. Columnas de Neutralización con lecho de caliza Flujo ascendente.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Instrumento de control y accesorios adicionales

3.4.2.1. Instrumento de control

El instrumento de control básico del equipo es el rotámetro (Figura 22), utilizado para el control del flujo de alimentación del agua residual a la unidad. Las especificaciones técnicas del rotámetro son:

- 1) Escala: 0 - 8000
- 2) Material: vidrio
- 3) Flotador: acero inoxidable



Figura 22. Instrumento de control del equipo de neutralización.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2. Accesorios del equipo de neutralización

Los accesorios más importantes: bomba centrífuga, arrancador, válvula de aguja, tanque de almacenamiento del agua residual (Figura 23). Las especificaciones técnicas de los accesorios son las siguientes:



Bomba centrífuga

Capacidad: 0,5 Hp
Voltaje: 110 v
Material: hierro
1.750 RPM



Tanque de alimentación

Material: polietileno
Capacidad: 55 gal

Figura 23. Accesorios del equipo de neutralización.

Fuente: Elaboración propia.

3.5. INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE LA UNIDAD

- 1) Con las dimensiones establecidas para el diseño, las columnas fueron construidas, usando moldes específicos para cada columna, y en tramos de 50 cm. con bridas para facilitar el ensamble.
- 2) Se empleó una estructura de hierro, para el soporte a las columnas, las cañerías, los accesorios, la bomba, el tanque de alimentación y el rotámetro.
- 3) Las columnas, se sujetaron a la estructura de hierro con abrazaderas, colocando todos los accesorios necesarios como: codos, nudos, té, válvulas, neopres, etc.
- 4) Se colocó la piedra caliza en cada columna, hasta la altura preseleccionada, 0,3 m.
- 5) Se instaló el tanque de alimentación con su bomba centrífuga, y una tubería de desviación para la recirculación y regulación de los flujos.
- 6) Se instaló el rotámetro, con sus accesorios, para el control del flujo de alimentación a las columnas.

- 7) Se realizaron las pruebas preliminares, para ejecutar los ajustes necesarios y dejar listo el equipo para las pruebas experimentales.
- 8) El equipo fue instalado con los accesorios necesarios a fin de permitir su desmontaje y recambio fácil de piedra caliza saturada.

3.6. MANUAL DE OPERACIÓN DE LAS COLUMNAS

Para la operación del equipo:

- 1) Llenar con piedra caliza, en las columnas, hasta la altura seleccionada para las pruebas.
- 2) Realizar una prueba en blanco, con agua potable, a fin de que todo el equipo y los accesorios funcionen eficientemente.
- 3) Colocar el agua residual seleccionada en el tanque de alimentación.
- 4) Prender la bomba y alimentar el agua residual a las columnas, para lo cual se fija en el rotámetro, mediante la válvula de aguja, el flujo preseleccionado.
- 5) Tomar una muestra de agua residual, a fin de realizar la caracterización inicial respectiva.
- 6) Colocar al final, de la última columna, un recipiente para recoger el agua tratada.
- 7) Tomar, cada 5 minutos, una muestra de 250 cc, de cada columna de lecho de caliza para determinar el pH.
- 8) Terminar la experimentación cuando la piedra caliza se encuentra saturada, para lo cual, se toman muestras que salen de las columnas de caliza, deberá ser comprobado con las pruebas respectivas de laboratorio.
- 9) Apagar la bomba, desalojar el agua, sacar la piedra caliza usada de las columnas; finalmente, lavar el equipo con agua potable.
- 10) Realizar una nueva experimentación, empezar la secuencia a partir del numeral 1, pudiendo variar la granulometría de la caliza.



CAPÍTULO IV

PRUEBAS EXPERIMENTALES A ESCALA DE LABORATORIO CON DIFERENTES REACTIVOS NEUTRALIZANTES

4. PRUEBAS EXPERIMENTALES A ESCALA DE LABORATORIO CON DIFERENTES REACTIVOS NEUTRALIZANTES

4.1. ANTECEDENTES

Las pruebas experimentales, a escala de laboratorio, se realizan para observar los distintos cambios que ocurren cuando se mezclan soluciones sintéticas ácidas y básicas, y compararlas con los gráficos existentes, en la literatura técnica, de diferentes autores como: Burns Raalph A, “Fundamentos de Química”; Guillermo Garzón, “Química General”; A. P. Kreschkow, A. A. Yaroslávsev, “Curso de Química Analítica”; Jairo Romero, “Tratamiento de Aguas Residuales”, etc. Estos ensayos servirán de base para la realización de pruebas con residuos líquidos industriales.

En las pruebas de neutralización ácido-base, se experimentaron con tres tipos de reacciones:

- 1) Ácido fuerte más base fuerte
- 2) Ácido débil más base fuerte y
- 3) Ácido fuerte más base débil

4.2. NEUTRALIZACIÓN DE UN ÁCIDO FUERTE CON UNA BASE FUERTE

4.2.1. Neutralización de una solución de ácido clorhídrico 0,1 N con diferentes reactivos alcalinos fuertes

En las experimentaciones, se emplean soluciones de ácido clorhídrico 0,1 N, concentración sugerida por (Garzón G., 2004), en el libro: “Química General”, página 267 en su libro: “Química General”, páginas 266 y 267, con diferentes reactivos alcalinos fuertes, entre los que se encuentran: hidróxido de sodio, 0,1 N; óxido de calcio (sólido); solución de hidróxido de calcio, etc.

4.2.1.1. Neutralización de una solución de ácido clorhídrico 0,1 N con hidróxido de sodio 0,1 N

A continuación, se utiliza hidróxido de sodio como reactivo para la neutralización, utilizando 20 ml de solución de ácido clorhídrico 0,1 N y diferentes cantidades de solución de hidróxido de sodio 0,1 N, cuyos resultados están tabulados en la Tabla 9.

Tabla 9. Neutralización de una solución de ácido clorhídrico 0,1 N con hidróxido de sodio 0,1 N

Solución HCl 0,1 N, ml	NaOH 0,1 N, ml	pH
20	0	1,00
20	2,00	1,10
20	4,00	1,14
20	4,60	1,16
20	16,60	1,78
20	17,65	2,24
20	18,20	2,56
20	18,50	2,64
20	19,10	2,85
20	19,58	3,80
20	19,70	4,06
20	19,90	5,09
20	20,10	9,71
20	21,30	11,44
20	25,38	11,95
20	26,80	12,10
20	40,00	12,26

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 9 presenta los datos de neutralización a volumen fijo de la solución de ácido clorhídrico 0,1 N, mediante hidróxido de sodio 0,1 N, observando que tanto el HCl como el NaOH son electrolitos fuertes que se disocian en un 100%, formando NaCl que es una sal neutra, en consecuencia se puede considerar que en realidad se añade una solución OH⁻ a otra de H⁺ produciéndose la neutralización.

Con los datos de la Tabla 9, se procede a graficar pH vs ml, NaOH 0,1 N añadido a la solución de ácido 0,1 N de HCl, dando como resultado el Figura 24, el mismo que es similar a la curva patrón, presentada por el profesor presenta (Garzón G., 2004), en el libro: “Química General”, página 267.

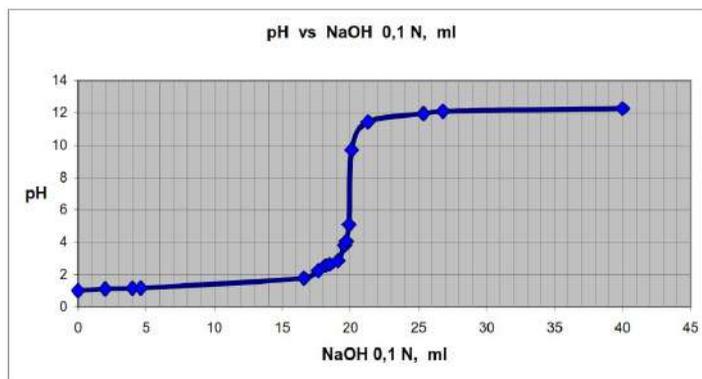


Figura 24. Neutralización de una solución de ácido clorhídrico 0,1 n con hidróxido de sodio 0,1 n.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 24 se aprecia que al ir agregando la base, el pH aumentará lentamente, hasta llegar a aproximadamente la cantidad 19,5 ml de base agregados, donde se forma el punto de inflexión inferior a un pH aproximado de 3, empezando a variar la curva marcadamente, y con un volumen de 20 ml llega a un pH de 7, llamado pH final o de equivalencia. Al continuar agregando la base, la curva varía hasta el punto de inflexión superior, el que ocurre a un pH aproximado de 10 con una adición de aproximadamente 20,02 ml de base. Si se continúa añadiendo la base hasta 40 ml, se observa que el pH llega a 12,26 manteniéndose alrededor de este valor, que indica que la solución está saturada.

4.3. NEUTRALIZACIÓN DE UN ÁCIDO DÉBIL CON UNA BASE FUERTE

4.3.1. Neutralización de una solución de ácido acético 0,1 N con hidróxido de sodio 0,1 N.

Se realiza la titulación de 20 ml de ácido acético 0,1 N con hidróxido de sodio 0,1 N; este caso difiere del anterior debido a que el ácido acético es un ácido débil y está parcialmente disociado; el producto es el acetato de sodio; que no es una sal neutra como en el caso del NaCl, y se obtiene la Tabla 10.

Tabla 10. Neutralización de una solución de ácido clorhídrico 0,1 n, utilizando hidróxido de calcio.

Solución CH ₃ COOH, 0,1 N, ml	Dosis NaOH 0,1 N, ml	pH
20	0	2,90
20	0,20	2,95
20	0,60	3,08
20	1,20	3,24
20	1,60	3,39
20	2,30	3,53
20	5,20	3,96
20	6,00	4,03
20	6,10	4,04
20	6,20	4,07
20	14,00	4,78
20	17,20	5,12
20	19,75	5,67
20	19,80	5,80
20	19,90	9,72
20	21,00	10,98
20	32,00	11,97

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 10 presenta los datos de la neutralización de la solución del ácido acético 0,1 N, mediante el uso de hidróxido de sodio 0,1 N, observando que el pH se incrementa a medida que se adiciona el hidróxido de sodio a un volumen fijo de la solución de ácido. La cantidad usada de reactivo es alta en relación a las pruebas anteriores, lo cual sugiere que la concentración de la base debe ser mayor para lograr la neutralización con menor cantidad de reactivo.

Con los datos de la Tabla 10, se graficó el pH vs NaOH 0,1 N, añadido a la solución de ácido 0,1 N de CH_3COOH .

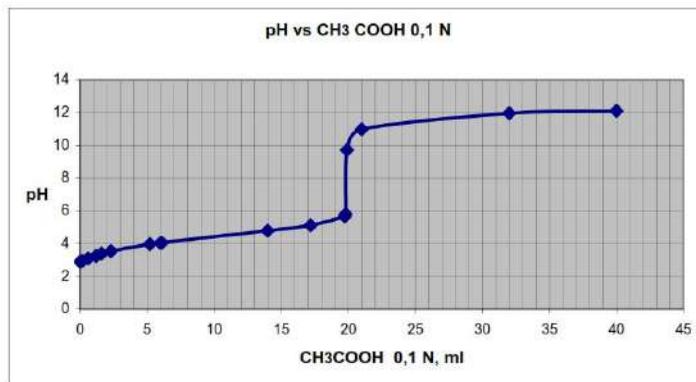


Figura 25. Neutralización de una solución de ácido acético 0,1 n con hidróxido De sodio 0,1 N.
Fuente: Elaboración propia.

Con los datos de la Tabla 10, se obtiene la Figura 25, que es similar a la curva de variación del pH durante la titulación de un ácido débil con una base fuerte que presenta el Profesor (Garzón G., 2004) en el libro: “Química General”, página 267.

Cuando la neutralización, se produce entre una base fuerte y un ácido débil, el anión del ácido sufre una hidrólisis produciéndose iones hidróxido, por lo que el pH es > 7 . En la figura, se observa que el punto de equivalencia se obtiene cuando se dosifica aproximadamente 20 ml del hidróxido de sodio 0,1 N. Eso ocurre aproximadamente a un pH de 8 que corresponde al pH de una solución diluida de CH_3COONa ; el sistema $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COONa}$, actúa como amortiguador sobre el pH.

4.4. NEUTRALIZACIÓN DE UNA BASE DÉBIL CON UN ÁCIDO FUERTE

4.4.1. Neutralización de una solución de hidróxido de amonio 0,1 N con ácido clorhídrico 0,1 N.

Se procede a continuación a realizar la neutralización de 20 ml de hidróxido de amonio 0,1 N con ácido clorhídrico 0,1 N, cuyos resultados están tabulados en la Tabla 11.

Tabla 11. Neutralización de una solución de hidróxido de amonio 0,1 n con ácido clorhídrico 0,1 n.

Solución NH_4OH , 0,1 N	HCl 0,1 N, ml	pH
20	0	11,0
20	4,0	10,0
20	8,0	9,3
20	16,0	8,8
20	18,0	8,5
20	19,5	6,4
20	19,9	3,9
20	22,0	2,0
20	24,0	1,8
20	26,0	1,5
20	35,0	1,2
20	40,0	1,0

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 11 presenta los datos de la neutralización de la solución de hidróxido de amonio 0,1 N mediante el uso de ácido clorhídrico 0,1 N, observando que el pH de la solución inicial es ligeramente alcalino, el producto que se obtiene de la reacción es el NH_4Cl .

Con los datos de la tabla 11, se grafica pH vs HCl 0,1 N, añadido a la solución de hidróxido de amonio 0,1 N, obteniéndose el Figura 26.

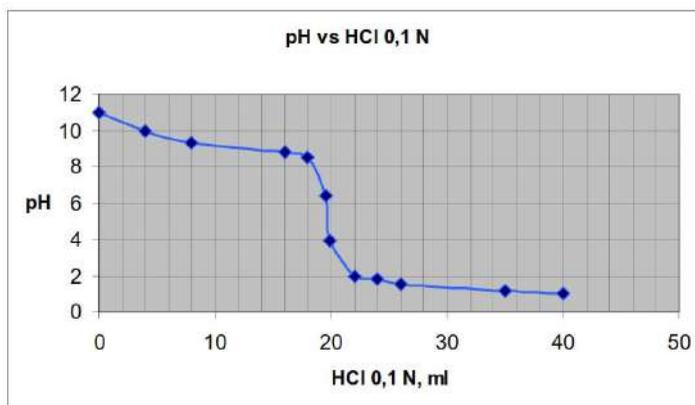


Figura 26. Neutralización de una solución de hidróxido de amonio 0,1 n con Ácido clorhídrico 0,1 n.
Fuente: Elaboración propia.

Con los datos de la Tabla 11, se obtiene la Figura 26. Esta curva es diferente a las obtenidas en los dos casos anteriores, en esta ocasión, en el matraz de valoración se encuentra no un ácido sino la base, por ello la curva de valoración se graficará de arriba hacia abajo, ya que el punto inicial de valoración corresponde al pH de la disolución de la base, la que se encuentra en un medio débilmente alcalino. Los puntos intermedios corresponden a una mezcla de la base débil con su sal, la solución en el punto de equivalencia contiene sólo NH_4Cl , siendo ácida debido a la presencia del ion amonio. El pH del punto de equivalencia es aproximadamente 5, el salto de valoración es considerablemente menor, que el caso de la valoración de un ácido fuerte. Observándose que se encuentra entre pH 4 y 6.

4.5. PRUEBAS EXPERIMENTALES EN COLUMNAS DE LABORATORIO CON PIEDRA CALIZA EN PROCESO CONTINUO

4.5.1. Neutralización utilizando una columna con lecho de caliza de 30, 60, 90 y 120 cm de profundidad de relleno y una granulometría de 6 mm con una solución sintética de ácido clorhídrico 0,1 N en proceso continuo

Para el proceso continuo, se requiere conocer el caudal de alimentación a las columnas, para lo cual se utilizó un rotámetro, el que fue calibrado, a fin de operar a un caudal definido. Luego, se grafica y obtiene la carga hidráulica superficial requerida con el caudal y área superficial de la columna.

4.5.1.1. Calibración del rotámetro de las columnas de laboratorio

Una de las variables del proceso continuo es el caudal de alimentación de agua residual a las columnas de laboratorio, el cual es controlado, mediante un rotámetro, que en este caso, es un equipo universal, que puede ser utilizado para la medición de caudales de diferentes fluidos, haciéndose necesario su calibración para un fluido en particular.

El tubo de vidrio del rotámetro tiene una escala graduada, que representa las diferentes alturas a las que puede llegar el flotador del rotámetro a diferentes caudales.

Procedimiento para la calibración del rotámetro:

- 1) Prender la bomba y fija con la válvula reguladora un caudal determinado del agua residual, impulsando el flotador del rotámetro a una altura determinada en la escala graduada del tubo de vidrio, por ejemplo 1.000. Se recoge, en una probeta graduada, por ejemplo un litro de agua residual, midiendo cuidadosamente, el tiempo en que tarda en llenarse la probeta de prueba.
- 2) Aumentar el caudal, con ayuda de la válvula reguladora, hasta una nueva altura en la escala del rotámetro; y continuar como en el punto 1.
- 3) Continuar el proceso hasta obtener como mínimo cinco datos a fin de que la calibración del rotámetro sea representativa; de esta manera, se obtiene la tabla 20.

4.5.1.2. Calibración del rotámetro

Tabla 12. Calibración del rotámetro.

Altura del rotámetro	Caudal, l/h	Caudal, m ³ /d	Factor de carga, m ³ /m ² .d	Factor de carga, m ³ /m ² .h
0	0	0	0	0
1.000	43,373	1,041	132,45	5,50
2.000	78,271	1,878	239,00	9,95
3.000	116,129	2,787	354,85	14,79
4.000	156,522	3,756	478,00	19,90
5.000	180,000	4,320	550,00	22,90
6.000	240,000	5,760	733,00	30,50
7.000	276,923	6,646	846,00	35,25
7.700	290,000	6,960	886,00	36,90

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 12 se utilizan alturas de 1.000 a 7.700, estos valores forman la escala del rotámetro, Se usó 1 litro de volumen; volúmenes mayores se tardan mucho tiempo para obtener un caudal determinado. Obteniéndose factores de carga entre 5,5 y 37 m³/m².h, rango que se encuentra dentro de los valores que sugiere Ramalho, cargas entre 2 y 40 m/h.

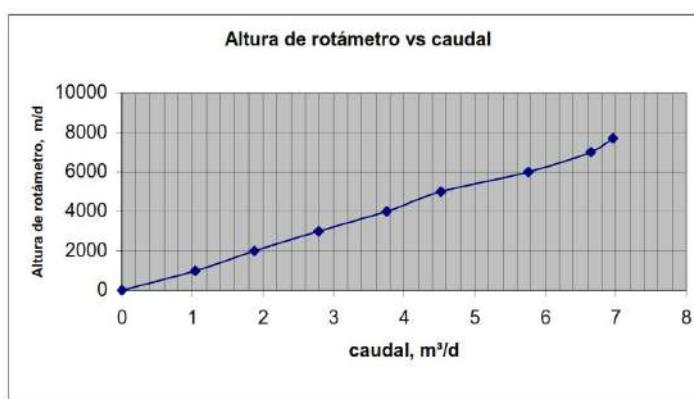


Figura 27. Calibración del rotámetro.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 27, se aprecia una recta la cual permite determinar, en cualquier momento, el caudal que presenta el sistema debido a ya que el rotámetro sólo requiere conocer la altura del mismo que es adimensional. A continuación, con los datos de los caudales y la determinación del área de la columna, se calcula el factor de carga, de la siguiente manera:

$$Q = vA \quad v = Q/A \quad A = D^2 / 4 \quad A = (10)^2 / 4 = 7.854 \times 10^{-3}$$

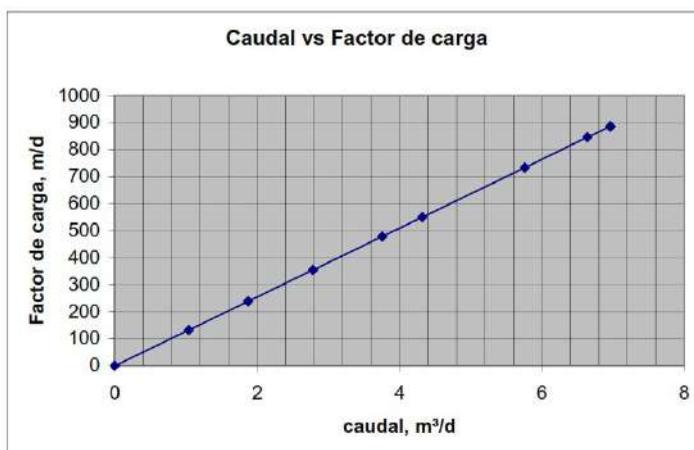


Figura 28. Calibración del rotámetro.

Fuente: Elaboración propia.

De los datos obtenidos de caudales de la tabla 12 y con el área de la columna, se calcula el factor de carga para cada altura de rotámetro y caudal; y con estos datos se elabora la Figura 28, la cual es una línea recta, mediante la misma se puede realizar pruebas experimentales a diferentes cargas hidráulicas.

4.5.2. Neutralización utilizando una columna con lecho de caliza de 30, 60, 90, 120 cm de altura de relleno con una solución de ácido clorhídrico 1n en proceso continuo

Se inició el ensayo preliminar con una solución ácida de pH 1; se hace pasar por las columnas a caudales de 1; 1,9; 3,7; y 5,76 m³/d, caudales que están dentro del rango en que opera el rotámetro, a fin de determinar el comportamiento de la caliza.

Se fijó una granulometría de 6 mm para la ejecución de estas pruebas, luego de las experimentaciones realizadas, luego de las pruebas experimentales de laboratorio de piedra caliza en proceso discontinuo.

A continuación, en la Tabla 13, se recopila el resultado de la corrida en el tiempo de dos horas, a fin de observar el comportamiento de la piedra caliza cuando se va aumentando progresivamente el caudal.

Tabla 13. Resultados de corrida en un tiempo de dos horas en una columna con lecho de caliza de 30, 60, 90, 120 cm de altura de relleno con una solución de ácido clorhídrico 1 N en proceso continuo.

Caudal, m ³ /d	Tiempo, min	30 cm pH	60 cm pH	90 cm pH	120 cm pH
1,0	0	1,00	1,00	1,00	1,00
1,0	5	4,77	5,57	5,67	5,78
1,0	10	5,27	5,59	5,67	5,72
1,0	15	5,40	5,71	5,92	5,94
1,0	20	5,41	5,86	6,05	6,16
1,0	25	5,19	5,67	5,94	6,11
1,9	30	5,60	5,94	6,11	6,16
1,9	35	4,84	5,67	6,05	6,13
1,9	40	4,60	5,44	5,71	5,83
1,9	45	4,78	5,49	5,72	5,81
1,9	50	4,84	5,52	5,75	5,84
1,9	55	4,89	5,56	5,78	5,89
1,9	60	4,62	5,58	5,83	5,98
3,7	65	4,27	5,32	5,57	5,67
3,7	70	3,97	5,25	5,56	5,66
3,7	75	3,77	5,10	5,44	5,56
3,7	80	3,76	5,12	5,45	5,57
3,7	85	3,75	5,13	5,46	5,58
3,7	90	3,69	5,07	5,42	5,55
5,8	95	3,45	4,41	5,14	5,37
5,8	100	3,56	4,59	5,16	5,34
5,8	105	3,47	4,62	5,21	5,42
5,8	110	3,48	4,57	5,19	5,37
5,8	115	3,47	4,51	5,18	5,39
5,8	120	3,49	4,41	5,00	5,32

Fuente: Elaboración propia.

Se determina que a medida que aumenta el caudal de 1 a 1,9 m³/d aumenta también el pH; pero luego al transcurrir el tiempo y aumentar el caudal disminuye el pH; esto se debe a que la piedra va disminuyendo su poder de neutralización, pero si se mantiene un caudal bajo, se puede producir por más tiempo, la neutralización de la solución ácida. Se realizó el incremento paulatino del caudal de la solución de ácido con la finalidad de observar el comportamiento de la caliza a diferentes profundidades, tratando de que ésta se sature; es decir se dejó de neutralizar, con lo cual se logra un pH alto en las diferentes columnas, luego de lo cual empieza a decrecer.

De la corrida se deduce que no es conveniente cambiar la carga hidráulica, se debe operar con la misma. Además, se observa que pudo introducirse un error del electrodo del pHmetro en algunas tomas de pH durante la experimentación.

Estos resultados experimentales sirvieron para proporcionar una idea más clara para investigar con el agua residual industrial. Con estos datos, se realizó en la Figura 29.

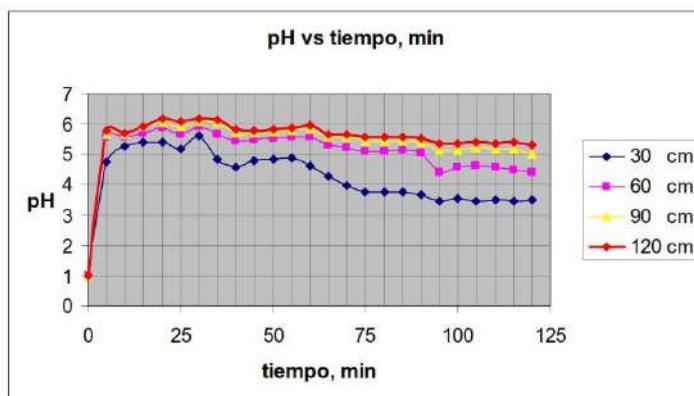


Figura 29. Neutralización utilizando una columna con lecho de caliza de 30, 60, 90, 120 cm de altura de relleno con una solución de ácido clorhídrico 0,1 n en proceso continuo.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 29, se aprecia el descenso del pH a medida que transcurre el tiempo. Además, cuando el relleno de caliza es de 120 cm, se obtienen valores de pH más altos, pero también está relacionado con el caudal de operación; en caudales intermedios como 1,9 m³/d, se obtiene una mejor neutralización.

4.6. EXPERIMENTACIÓN CON AGUAS REDUALES INDUSTRIALES

Para las corridas experimentales, en proceso continuo, con un efluente industrial ácido, se utilizaron: el agua residual de una destilería de alcoholes (vinaza) y el agua residual de una industria de café soluble. Las corridas experimentales son detalladas a continuación.

4.6.1. Experimentación con un efluente industrial ácido, generado por una destilería de alcohol (vinaza)

Tabla 14. Caracterización del efluente industrial ácido generado por una destilería de alcohol(vinaza).

Parámetro	Unidad	Efluente	Método
pH		4,29	4.500 H B
DBO ₅	mg/l	42.000	DBO TRACK
DQO	mg/l	74.333	5.220 D
Sólidos totales	mg/l	78.490	2.540 B
Hierro	mg/l	2,45	3.500 Fe

Fuente: Laboratorio de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil.

Se observa en la Tabla 14, que el agua residual tiene un pH ácido que requiere ser neutralizado antes de empezar los tratamientos de agua, así como también una alta carga orgánica y cantidad elevada de sólidos totales.

4.6.2. Neutralización del agua residual ácida de una destilería de alcohol (vinaza), utilizando NaOH 0,1 N en proceso discontinuo

Entre las industrias con efluentes ácidos, se tienen las destilerías de alcohol, que descargan un efluente muy ácido que es la vinaza. Se ejecutó un ensayo con vinaza; se empleó para la neutralización, una solución 0,1 N de hidróxido de sodio, obteniéndose la Tabla 15.

Tabla 15. Neutralización del agua residual ácida de una destilería de alcohol (vinaza), utilizando NaOH 0,1 N en proceso discontinuo con una muestra de 50ml de vinaza.

Dosis de hidróxido de sodio, 0,1 N, ml	pH
0	4,29
0,1	4,34
0,2	4,34
1,9	4,36
3,2	4,40
4,1	4,43
5,6	4,47
27,7	5,08
47,9	5,99
54,5	6,86
57,6	7,53
61,1	8,21
64,3	8,69
66,3	8,93
70,5	9,42
96,0	10,57
123,0	11,04
164,8	11,30
230,0	11,89

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 15 se muestra que en las pruebas realizadas con el agua residual de una destilería, es observable que a medida que se dosifica el hidróxido, al residuo vinaza, se presenta una mayor dificultad en la neutralización debido a que dicho residuo tiene exceso de sólidos suspendidos, lo cual dificulta la neutralización. Se observa que al aumentar la dosificación de álcali pero el pH, se incrementa lentamente, necesitándose un volumen mayor de neutralizante de la muestra para lograr la neutralización, lo cual no resultaría rentable ya que por cada litro de vinaza, se necesitaría aproximadamente 1,2 litros de álcali, con los resultados de la tabla, se obtiene la Figura 30.

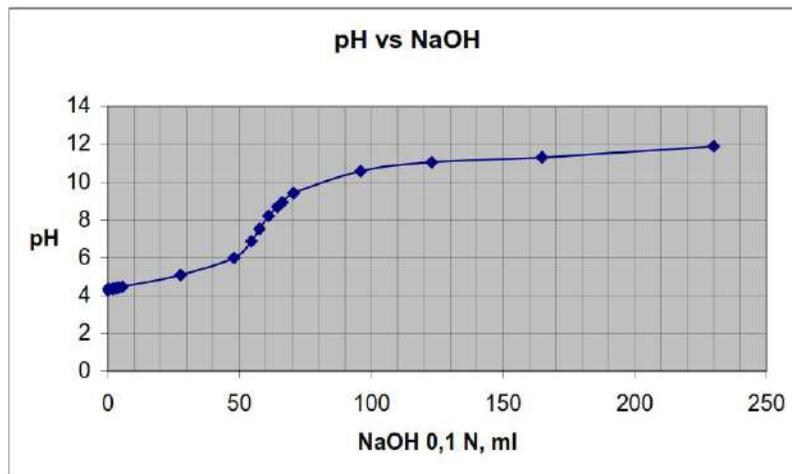


Figura 30. Neutralización del agua residual ácida de una destilería de Alcohol (vinaza), utilizando naoh 0,1 n en proceso discontinuo.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30, se observa que se requieren más de 55 ml de solución de hidróxido de sodio 0,1 N para que se neutralice la muestra de 50 ml de vinaza, lo cual indica que es necesario proceder a un tratamiento previo antes de la neutralización, para bajar la concentración elevada de sólidos suspendidos que interfieren en el proceso de neutralización.

4.6.2.1. Pruebas experimentales de agua residual ácida (vinaza) neutralizada en lechos de caliza, en proceso discontinuo.

En probetas de laboratorio, se procedió a tratar la vinaza utilizando piedra caliza de diferente granulometría, con alturas de relleno: 3, 6, 9, 12 y 15 cm, obteniéndose los siguientes resultados

4.6.2.2. Neutralización de vinaza, utilizando caliza de 4 mm de granulometría

GRANULOMETRÍA DE LA PIEDRA CALIZA: 4 mm

Volumen de vinaza utilizada: 250 ml

Cinco probetas con: 3, 6, 9, 12 y 15 cm de profundidad de caliza

pH inicial = 4,29

Tabla 16. Neutralización de vinaza, utilizando caliza de 4 mm de Granulometría.

PROFUNDIDAD DE LECHO DE CALIZA					
	3 cm	6 cm	9 cm	12 cm	15 cm
Tiempo, min	pH	pH	pH	pH	pH
0	4,29	4,29	4,29	4,29	4,29
5	4,30	4,40	4,45	5,00	5,80
10	4,50	4,70	4,50	5,50	6,30
15	4,60	5,00	5,30	6,00	6,40
20	5,50	6,00	6,30	6,60	6,65
25	5,50	6,40	6,50	6,70	6,80
30	5,50	6,50	6,60	6,75	6,83

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 16, se obtuvo a partir de las pruebas realizadas en 5 probetas de 500 ml en las que se dosifican 3, 6, 9, 12 y 15 cm de caliza, y 250 ml de vinaza; se toman valores de pH cada 5 minutos a fin de verificar los cambios que se producen en el pH con el tiempo, obteniéndose valores cercanos a la neutralización a partir de los 30 min y con una altura de relleno de 15 cm., deduciéndose que con estas pruebas no se llega al punto de referencia que es pH 7. Con los datos de la tabla 18, se realizó el Figura 31.

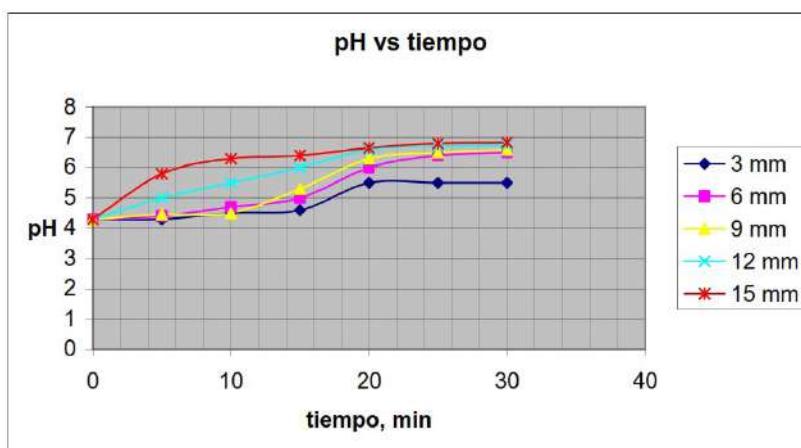


Figura 31. Neutralización de vinaza, utilizando caliza de 4 mm de granulometría .

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 31, se aprecia que el máximo valor de pH de 6,83, se obtiene con el lecho de caliza de 15 cm en un tiempo de 30 min. En las demás probetas se obtienen valores cercanos a la neutralización con mayores tiempos de contacto.

4.6.2.3. Neutralización de vinaza, utilizando caliza de 6 mm de granulometría

GRANULOMETRÍA DE LA PIEDRA CALIZA: 6 mm

Volumen de vinaza utilizada: 250 ml

Cinco probetas con: 3, 6, 9, 12 y 15 cm de profundidad de caliza

pH inicial = 4,29

Esta tabla, se la confecciona de la misma forma de la anterior.

Tabla 17. Neutralización de vinaza, utilizando caliza de 6 mm de granulometría.

PROFUNDIDAD DE LECHO DE CALIZA					
	3 cm	6 cm	9 cm	12 cm	15 cm
Tiempo, min	pH	pH	pH	pH	pH
0	4,29	4,29	4,29	4,29	4,29
5	4,50	4,80	4,50	5,00	6,00
10	5,00	5,40	5,50	5,60	5,80
15	5,50	5,70	5,80	5,90	6,30
20	5,60	6,00	6,20	6,50	6,60
25	5,80	6,30	6,50	6,75	6,90
30	5,95	6,65	6,78	6,80	6,97

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 17, se observa la prueba con caliza de 6 mm. Con 15 cm de altura de caliza, se obtiene casi la neutralización a los 30 minutos. Ese valor de pH cumple los requisitos de la legislación ambiental ecuatoriana. Con estos datos, se elabora el Figura 32.

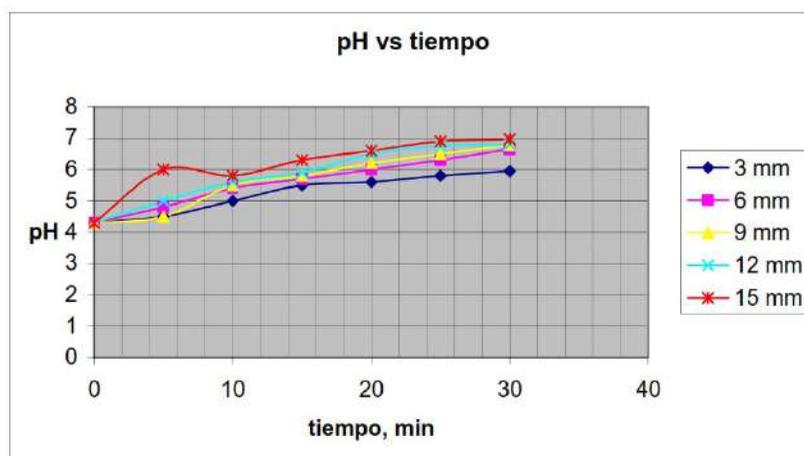


Figura 32. Neutralización de vinaza, utilizando caliza de 6 mm de granulometría.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 32, se observa que a medida que pasa el tiempo, la neutralización del agua residual no prospera, y que se logra como máximo, pH 6,97. Luego de 30 min, la neutralización casi no continúa debido al exceso de sólidos.

En el Figura 32, se observa claramente que entre 25 y 30 min, se necesitan para la neutralización, cantidades altas de caliza. Lo dicho anteriormente en el análisis de la tabla 17 corrobora el Figura 32.

De estas pruebas experimentales, a escala de laboratorio, se deduce que es necesario un tratamiento previo para eliminar los sólidos en suspensión presentes, motivo por el cual no es recomendable utilizar este efluente en tratamiento continuo en columnas de laboratorio, porque estas se saturarían inmediatamente, sin permitir el trabajo de neutralización.

4.6.3. Neutralización del agua residual ácida de una industria de café soluble, utilizando NaOH 0,1 N en proceso discontinuo

Otra de las industrias que producen efluentes ácidos es la industria de café soluble. A continuación se presenta una descripción breve de la generación de este efluente.

Tabla 18. Características principales de las aguas residuales de una industria del café.

Parámetro	Unidades	Entrada
pH		4,75
Conductancia	Micromhos/cm	1700
Color	Pt-Co	2210
Turbiedad	NTU	440
DBO	mg/l	1300
DQO	mg/l	2927
SST	mg/l	800
SDT	mg/l	1140
Aceites y grasas	mg/l	8

Fuente: Análisis realizados en Laboratorio de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil.

En la tabla 18, se observa que el agua residual presenta un pH ácido, una DBO y DQO altas, por lo que requiere tratamientos secundario y terciario debiendo realizarse, en primer lugar, una neutralización a fin de facilitar la eliminación de los contaminantes.

PRUEBA EXPERIMENTAL

La muestra del agua residual industrial es sometida a una neutralización con NaOH 0,1 N, iniciándose con un pH de 4,75; valor obtenido en la caracterización del efluente. A continuación, se elabora la tabla 18.

Tabla 19. Características principales de las aguas residuales de una industria del café con muestra de 50 ml.

NaOH 0,1 N, ml	pH
0	4,75
0,15	4,80
0,60	4,92
0,80	5,02
1,00	5,13
1,20	5,28
1,40	5,45
1,80	6,17
2,00	6,49
2,20	7,29
2,45	7,92
2,60	8,54
2,80	8,99
3,00	9,51
3,40	9,91
5,00	10,29
5,4	10,64
6,00	11,06
7,00	11,23
8,00	11,33
10,00	11,51
14,00	11,71
17,4	11,82
25,00	11,99
37,00	12,12

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 19, se aprecia, que para lograr la neutralización de los 50 ml de agua residual, se necesitan aproximadamente 2,1 cc de solución para la neutralización, lo cual indica que es una solución de neutralización fácil. Con los datos de la tabla, se obtiene el Figura 33.

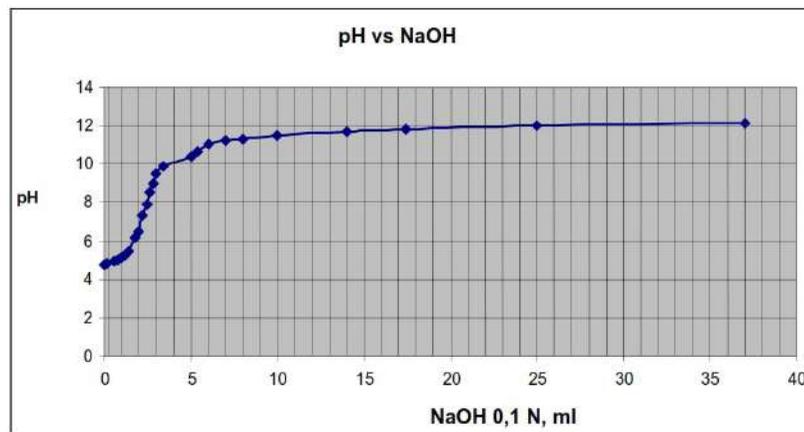


Figura 33. Neutralización del agua residual de una industria del café, utilizando NaOH 0,1 n.
Fuente: Elaboración de la investigación.

De la Figura 33, se observa que el punto de inflexión inferior, se encuentra a pH 5,5; y el punto de inflexión superior está a pH 10, lo que indica que el punto de equivalencia, se encuentra a un pH aproximado de 7. También se aprecia que a medida que se dosifica con hidróxido de sodio, el pH se va estabiliza. La neutralización del agua residual, se consigue al adicionar 2,1 ml de solución alcalina.

4.6.4. Pruebas experimentales de agua residual ácida de una industria, neutralizada en lechos de caliza, en proceso continuo

Para estas pruebas, se utiliza el método recomendado por Eckenfelder y Ford, para la obtención de los datos básicos de diseño de un sistema de neutralización de un agua residual industrial. Se realizan las experimentaciones con piedra caliza de 6mm de granulometría, determinada en pruebas de laboratorio en operación discontinua.

4.6.5. Relación entre el ph del afluente y la carga hidráulica en la columna de neutralización a diferentes profundidades de lecho de caliza con granulometría 6 mm.

A partir de los valores de pH en función de la carga hidráulica, para cada profundidad de lecho de caliza, obtenidos en las pruebas experimentales de agua residual ácida de una industria, se elabora la tabla 20.

Tabla 20. Relación entre el pH del afluente y la carga hidráulica en la columna de neutralización a diferentes profundidades de lecho de caliza.

PROFUNDIDAD DE LECHO DE CALIZA 6mm					
Carga hidráulica, $m^3/m^2 \cdot h$	0,3 m	0,6 m	0,9 m	1,2 m	
	pH	pH	pH	pH	
5,0	8,3				
5,5	7,1				
10,0	6,1				
15,0	5,5	8,7			
20,0		6,9	8,8		
25,0		6,3	7,3	8,98	
30,0		5,6	6,5	7,50	
35,0			6,3	6,95	
36,9				6,80	

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron los resultados de la tabla 20 para diferentes caudales, que originaron diferentes cargas hidráulicas, valores que al graficar servirán para determinar los datos de diseño para un caudal específico y a un pH al que se quiera neutralizar la muestra en investigación. No se continúa tomando datos a otras cargas hidráulicas ya que ya se logró en cada caso la Neutralización y luego empieza a descender el pH. Con estos datos, se obtiene la siguiente figura:

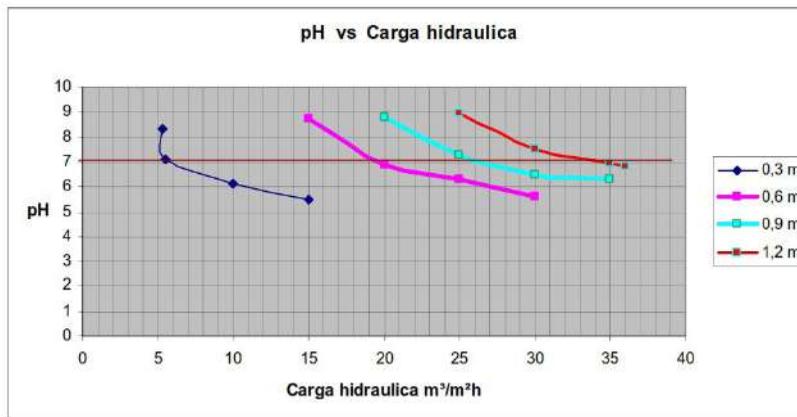


Figura 34. Relación entre el pH del afluente y la carga hidráulica en la columna de neutralización a diferentes profundidades de lecho de caliza.

Fuente: Elaboración de la investigación.

El Figura 34, presenta cuatro curvas que corresponden a los resultados obtenidos en las columnas con diferentes alturas de lecho de caliza, observándose que el máximo pH alcanzado fue 9; se partió de un agua residual de pH 4,8. Con esta gráfica, se puede determinar

el factor de carga efectivo para el pH neutro que se requiere. Este gráfico constituye el resultado de toda la investigación y guarda similitud con los gráficos típicos de los diferentes autores que han sido la guía de esta investigación: gráficos N° 3,44 y 3,45 del libro Tratamiento de Aguas Residuales de Ramalho, págs. 173 y 174; gráficos N° 3,12 y 3,13 del libro Industrial Water Pollution Control de W. Wesley Eckenfelder, Jr. y los gráficos N° 14,10 y 14,11 del libro Tratamiento de Aguas Residuales, de Jairo Romero Rojas.

4.7. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN LECHO DE FLUJO ASCENSIONAL DE CALIZA, DE UN RESIDUO LÍQUIDO ÁCIDO DE UNA INDUSTRIA DEL CAFÉ, BASADO EN LA INVESTIGACIÓN.

Con base a las pruebas desarrolladas en el proceso continuo, se diseñó un lecho de flujo ascensional de caliza de un residuo ácido de una industria del café; se sigue el procedimiento descrito por Ramalho en su libro “Tratamiento de Aguas Residuales”, páginas 173 y 174. Se parte de los datos de los ensayos de laboratorio y se procede de la siguiente manera:

- 1) Para un pH de 7, se lee en el gráfico de neutralización con caliza para las profundidades de lecho de 30, 60, 90, 120 cm; se determina la carga hidráulica admisible para cada profundidad del lecho de caliza.
- 2) Se calcula el área de la sección, volumen requerido de caliza y factor de carga detallado en la tabla 36.
- 3) Se calcula el área del lecho de caliza, para cada profundidad, dividiendo el caudal tratado para la carga hidráulica admisible para cada profundidad.
- 4) Se calcula el volumen del lecho de caliza, multiplicando el área obtenida en el numeral anterior por la profundidad del lecho.
- 5) Se calcula la carga hidráulica volumétrica, dividiendo el caudal para el volumen del lecho de caliza, obtenido en el numeral anterior.
- 6) Se dibuja un gráfico de la carga hidráulica volumétrica contra la profundidad del lecho, como el indicado en el Figura 42; de dicho gráfico se obtiene la profundidad más económica del lecho de caliza.

4.8. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO

Para esta prueba se utiliza el método recomendado por Eckenfelder y Ford, para la obtención de los datos básicos para el diseño de un sistema de neutralización de un agua residual industrial, para un caudal de 10 m³/h. Dato asumido en base a caudales de descarga de in-

dustrias locales de café soluble.

4.8.1. Datos experimentales

Tabla 21. Carga hidráulica: 5; 5,5; 9,95 y 14,79 $m^3/m^2.h$.

Altura, m	Carga hidráulica, $m^3/m^2.h$	Área, m^2	Volumen de caliza, m^3	Caudal específico, $m^3/h.m^3$
0,3	6,0	1,667	0,500	20,00
0,6	19,0	0,526	0,316	31,64
0,9	26,0	0,385	0,347	28,82
1,2	32,5	0,308	0,369	27,10

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 21, se elabora a partir de la figura 34 en el cual se determina la carga hidráulica a partir del pH 7 para cada columna de neutralización. Luego, se obtiene el área que corresponde a la división del caudal para la carga hidráulica. Dato, que, multiplicado por la altura, es igual al volumen de la caliza requerida para cada altura; y por último, se divide el caudal para el volumen, obteniéndose el caudal específico.

Con los caudales específicos y las diferentes profundidades del lecho, se traza una curva que indica el lecho más económico que corresponde a un máximo de la curva; con base a este dato se determina el área de la sección y diámetro.

4.8.2. Determinación de la profundidad óptima del lecho

A partir de los datos de la tabla 21, se elabora el Figura 35, que indica el lecho que es más económico.

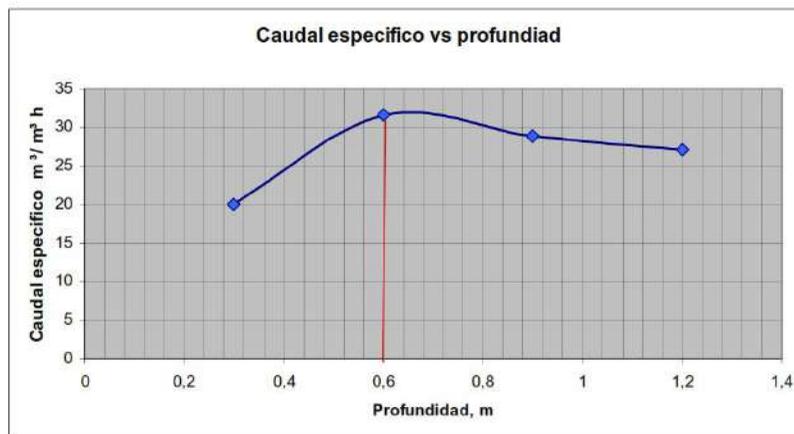


Figura 35. Aplicación del procedimiento de laboratorio.

Fuente: Elaboración de la investigación.

En la Figura 35, indica que un lecho de caliza de 0,6 m es el más económico, que corresponde a un máximo de la curva; el área de la sección es, en este caso, de 0,526 m²; de acuerdo a la tabla 21, para esta altura, el diámetro es 0,82 m, la carga hidráulica 19 m³/m² d y el volumen del lecho es 0,316 m³.

4.9. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CALIZA CONSUMIDA DIARIAMENTE

Caudal = 10 m³/h = 240 m³/d

Área del lecho: 0,526 m²;

Volumen del lecho: 0,316 m³.

Profundidad del lecho: 0,6 m

Se requieren 840mg Ca(OH)²/l para elevar el pH a 7 del agua residual de café soluble (determinado experimentalmente mediante titulación de una solución de 10.000 mg/l, en 500 ml de agua residual).

Se considera, según W. Wesley Eckenfelder, Jr., Industrial Water Pollution Control pág. 79, que la reactividad de la caliza es del 60% en comparación con la cal, y la masa unitaria de caliza de 1400 kg/m³, tomado de la Revista informativa de la Planta de Calcáreos Huayco, pág. 6. Dato que corresponde a la densidad aparente de los agregados de caliza que varía de 1300 a 1600 Kg/m³, que, se utiliza en la práctica, de acuerdo al libro del Ministerio de Energía y Minas de Colombia, Dr. Mario Maya. Bogota, 2003.

NOMENCLATURA

C: concentración
m: masa de la caliza
Q: caudal t: tiempo
V: volumen del reactor

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CALIZA CONSUMIDA DIARIAMENTE

$$C = \frac{m}{V} \quad m = C * V \quad \frac{m}{t} = \frac{C * V}{t} \quad Q = \frac{V}{t} \quad \frac{m}{t} = C * Q$$
$$\frac{m}{t} = 840 \frac{mg \text{ Ca(OH)}_2}{\text{litros}} * 240 \frac{m^3}{d} * \frac{1Kg \text{ Ca(OH)}_2}{10^6 mg \text{ Ca(OH)}_2} * \frac{100l}{m^3} * \frac{100Kg \text{ de caliza}}{60Kg \text{ Ca(OH)}_2}$$
$$\frac{m}{t} = 336Kg \text{ caliza/d}$$

CÁLCULO DE LA MASA DE CALIZA EN EL NEUTRALIZADOR

$$\text{Masa} = \text{Volumen} * \text{densidad}$$
$$\text{Masa} = 0,316 \text{ m}^3 * 1400 \text{ Kg / m}^3$$
$$\text{Masa} = 442,4 \text{ Kg de caliza}$$

CÁLCULO DEL PERÍODO DEL REEMPLAZO DE LA CALIZA EN EL NEUTRALIZADOR

$$\text{Periodo de reemplazo} = \frac{\text{masa de calizaz en el neutralizador}}{\text{masa de caliza consumida diariamente}}$$

$$\text{Periodo de reemplazo} = \frac{442,4Kg \text{ caliza}}{336Kg \text{ caliza/d}} * 24h/d$$

$$\text{Periodo de reemplazo} = 31,6h$$

CÁLCULO DEL COSTO DEL TRATAMIENTO

Cálculo de la cantidad de caliza utilizada durante el recambio

$$336 \frac{Kg}{d} * 31,6h * \frac{d}{24h} = 442,4Kg$$

Determinación del costo de tratamiento por kilogramo de caliza

$$8m^3 = \$115 \text{ Dato proporcionado por PLANT CALCAREOS HUAYCO}$$

$$\text{Entonces } 1m^3 = \$14375$$

$$\text{Densidad} = 1400 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\text{Densidad} = \frac{m}{V}; m = \text{Densidad} * V$$

$$m = 1m^3 * 1400 \frac{Kg}{m^3}$$

$$m = 1400Kg$$

$$\frac{\$14375}{1400Kg} = \frac{\$}{Kg}$$

$$\$0,0103/Kg$$

Cálculo del costo de la caliza utilizada en el recambio.

$$442,4 Kg * \$0,0103/Kg = \$4,56$$

Cálculo del volumen de agua residual tratado en el recambio

$$10m^3/h * 31,6h = 316m^3$$

Determinación del costo de tratamiento de la neutralización de cada m³ de agua residual

$$\$4,56 / 316m^3 = 0,0144 \$/m^3$$

5. BIBLIOGRAFÍA

- Anthony Carpi PH.D. (2003). <http://www.visionlearning.com/>. Obtenido de <http://www.visionlearning.com/es/library/Qu%C3%ADmica/1/%C3%81cidos-y-Bases/58/reading>
- Arroyave, G., Rojas, O., & Torres, P. (1996). Depuración anaerobia de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en sistemas de fases de fases separadas. (U. d. Valle, Ed.)
- ASOCAE ONGD, A. E. (2012). <http://www.natureduca.com>. Obtenido de http://www.natureduca.com/quim_acidez_introd02.php
- Brunett, A., & Velebil, G. (1976). Purificación de las aguas residuales mediante un tratamiento con gases de humo. *Revista ITB*.
- Burns, R. A. (2003). *Fundamentos de Química (Vol. Cuarta Edición)*. (E. Q. Duarte, Ed.) México: Pearson Educación.
- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2013). *Química*. México D.F.: Mc GrawHill.
- Chernicharo. (1997). *Principios do Tratamento Biológico de Aguas Residuárias (Vol. 5)*. Brasil: Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Sanitaria y Ambiental.
- Degrémont. (1979). *Manual Técnico del Agua (4 ed., Vol. 4)*. Bilbao, España: Artes Gráficas Grijelmo,S.A.
- FisicaNet. (2007). <http://www.fisicanet.com.ar>. Obtenido de http://www.fisicanet.com.ar/quimica/equilibrio_quimico/ap02_acidez.php
- Freire Espín, P. A. (2012). Análisis y evaluación de sun sistema de tratamiento de aguas residuales para la empresa TEIMSA-AMBATO. Riobamba: Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.
- Garzón G., G. (2004). *Fundamentos de Química General (Vol. Segunda Edición)*. México D.F., México: Mc. Graw-Hill.
- Gibanel, L. (Junio de 1987). Utilización del anhídrido carbónico en la neutralización de efluentes alcalinos. *Ingeniería Química*.
- Hincapié, D. A. (Julio de 2015). DESARROLLO Y ESCALADO DE UN PROCESO PARA LA NEUTRALIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES ALCALINAS CON GASES DE CHIMENEA. (I. U. Herrera, Ed.) *Quid(1692-343X)*, 57-68.
- Hincapié, D., Gallego, D., & Usme, W. (2009). Neutralización de aguas residuales alcalinas con gases de chimenea: análisis de parámetros. *Ingeniería Química*, 122-128.
- Jiménez Liso, M. R., & De Manuel Torres, E. (2002). La Neutralización ácido-base a debate. *Enseñanzas de la Ciencia*.
- Jiménez Liso, M. R., & De Manuel Torres, E. (2002). La Neutralización Ácido-Base a debate. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(3). Obtenido de <http://www.raco.cat/index.php/ensenanza/article/viewFile/21837/21671>
- Leandro Herrera Z. Ph.D. (2013). <http://www.cec.uchile.cl/>. Obtenido de <http://www.cec.uchile.cl/~leherrer/iq651/Apunte1/Fisicoqapu01.htm>
- Manahan, S. (2004). *Environmental Chemistry (Octava ed.)*. Boca Raton: CRC Press.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. México: Mc. Graw-Hill.

- Moeller, T. (1988). *Química Inorgánica*. Barcelona: Reverté.
- Nalco Chemical Company. (1995). *Manual del Agua Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. (Vol. Tomo II). (P.-M. S.A., Ed.) San Lorenzo, México: Mc. Graw-Hill.
- Nalco Chemical Company. (1995). *Manual del Agua: Su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones* (Vol. Tomo I). (P.-M. S.A., Ed.) San Lorenzo, México: Mc. Graw-Hill.
- Never, N. (2000). *Air Pollution Control Engineering* (Segunda ed.). Boston: McGraw-Hill.
- Noriega Editores. (2001). *Manual de Tratamiento de Aguas*. Balderas, México: Limusa S.A.
- Ramallo, R. S., Beltrán, D. J., & Lora, F. d. (1990). *Tratamiento de aguas residuales* (Vols. 8429179755, 9788429179750). Reverte.
- Robert A. Corbitt. (2003). *Manual de Referencia de la Ingeniería Medioambiental*. España: Mc. Graw-Hill.
- Romero Rojas, J. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Colombia: Escuela Colombiana.
- Rypley, L., Boyle, W., & Coverse, J. (1986). Improved alkanimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *Journal water pollution control federation*, 58.
- Sánchez, A., & Manzano, R. (2002). Reducción pH de las aguas residuales alcalinas de la empresa Progel S.A. mediante gases de combustión de caldera. Universidad Nacional de Colombia sede en Manizales.
- Tatón, R. (1988). *Historia general de las ciencias*. Barcelona: Orbis.
- Theodore L., B., H. Eugene, L. J., Bruce E., B., & Julia R., B. (2003). *Química La ciencia central* (Novena ed.). México D.F.: Pearson.
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2015). <http://datateca.unad.edu.co>. Obtenido de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358041/EXE/leccin_18_neutralizacin.html

6. NOMENCLATURA

Ablandamiento cal - soda	Proceso de tratamiento de agua para la precipitación de iones de calcio y magnesio por reacción con la cal y ceniza sódica (carbonato de calcio comercial).
Agente oxidante	Cualquier sustancia, como oxígeno y cloro, que arranca electrones. Lo contrario es un agente reductor.
Agua residual	Agua y sólidos empleados por una comunidad, incluyendo el agua procedente de los procesos industriales que fluyen a una planta de tratamiento o un cuerpo hídrico receptor.
Ácido	Sustancia que produce iones hidrógeno o, con más precisión, iones hidronio en solución.
Acidus	Agrio.
Ácido débil	Ácido que se ioniza en agua en proporción baja (menos del 5%).
Ácido fuerte	Ácido que se ioniza en el agua por completo.
Ácido estándar	Solución de un ácido cuya concentración, se conoce con precisión; se usa un ácido estándar en una titulación para determinar la concentración de una base.
Ácidos y bases de Brønsted-Lowry	Ácido que se define como donador de protones, y una base como aceptor de éstos. Cuando un ácido pierde un protón se forma una especie que potencialmente puede aceptarlo, es decir, una base conjugada del ácido original.
Álcali	Sustancia que tiene las propiedades de una base.
Alcalinidad	Capacidad del agua para neutralizar los ácidos, originada en su contenido por carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos y, a veces, borato, silicato y fosfato; la alcalinidad, se expresa en mg/l o equivalentes de carbonato de calcio; la alcalinidad no equivale al pH.
Amortiguador	Es un par de sustancias químicas que cuando están presentes en una solución dada, pueden mantener el pH casi constante cuando se agrega un ácido o una base.

Analito	Especie presente en una muestra del cual se busca información analítica.
Anión	Ion con una carga negativa
Áridos	Los elementos piedra y arena, se llaman “áridos” por ser la parte inerte del conjunto.
Balance de materia	Contabilidad de las masas de los materiales que entran y salen de un proceso, normalmente relacionados en un intervalo de tiempo.
Base	Sustancia que produce iones hidróxido en solución; también, se define como una sustancia capaz de aceptar un ion hidrógeno (un protón).
Base débil	Compuesto que reacciona con el agua produciendo iones hidróxido en proporción baja (menos del 5%)
Base estándar	Solución de una base cuya concentración, se conoce con precisión; se usa una base estándar en una titulación para determinar la concentración de un ácido.
Bipolar	Cuando existe diferencia en la electronegatividad de los átomos que componen una molécula, se presenta una acumulación de carga electronegativa en el átomo negativo induciendo una carga positiva en el átomo electropositivo; forman, así, dos polos de signo contrario en la molécula que producen un momento eléctrico llamado momento bipolar, igual a la carga de uno de los dipolos por la distancia \square entre ellos.
Cal hidratada	Piedra caliza quemada y tratada con agua en condiciones controladas hasta que el óxido de calcio, se convierta en hidróxido de calcio
Capacidad amortiguadora	La cantidad máxima de ácido o base que se puede agregar a una solución amortiguada antes de que el pH empiece a cambiar de manera significativa.
Catión	Ion con carga positiva
Compost	Mezcla de productos orgánicos, biológicamente estable, que se emplea como acondicionador del suelo.

Corrosión	Descomposición gradual o destrucción de un material por acción química, a menudo, ocasionada por reacciones electroquímicas.
Drano	Producto patentado para destapar cañerías; está constituido por trozos de aluminio metálico mezclados con hidróxido de sodio; se produce hidrógeno gaseoso cuando el “drano”, se adiciona al agua.
Desulfuración	Cualquier técnica de control, en su origen, para la limpieza de combustible como la del carbón para la reducción de azufre previo a su ignición.
Destilado	En la destilación de una muestra, una porción se evapora; la parte que posteriormente condensa, se llama destilado.
Disolución	Se presenta disolviendo un sólido en un líquido; el primero, se denomina soluto y el líquido disolvente. Se puede preparar también mezclando dos líquidos.
Dureza Mohs	Medida de la dureza de los minerales en una escala de 1 a 10, de lo más suave a lo más duro.
Electrólisis	Descomposición de la materia mediante una corriente eléctrica externa.
Electrolitos	Especies de soluto cuyas soluciones acuosas conducen electricidad.
Electrolitos débiles	Solutos que no se disocian por completo en iones en un solvente particular.
Electrólitos fuertes	Solutos que se disocian por completo en iones en un solvente particular.
Electrón	Partícula extremadamente pequeña cargada negativamente. La parte del átomo que determina sus propiedades químicas.
Equivalente	Para una reacción de oxidación-reducción, es el peso de una especie que puede donar o aceptar 1 mol de electrones. Para una reacción ácido-base, el peso de una especie que puede donar o aceptar un mol de protones.

Hidrólisis	Reacción química en la que un compuesto, se convierte en otro por la captación de agua.
Lejía	Hidróxido de sodio.
Métodos volumétricos	Métodos de análisis en cuales la medición final es un volumen del titulante patrón necesario para reaccionar con el analito en una cantidad de muestra conocida.
Mol	Peso molecular de una sustancia expresado en g.
Monitorización	La práctica de investigar, vigilar y/o muestrear fuentes líquidas en un esfuerzo de obtener información sobre la cantidad y calidad del caudal.
Normalidad	Número de pesos equivalentes de una especie en un litro de solución.
pH	Logaritmo negativo de la actividad de iones hidrógeno de una solución.
Protón	La partícula con carga positiva y una masa de una μ ma que forma parte del núcleo de todos los átomos. El número de protones determina la identidad del elemento.
Punto de equivalencia	Es el punto donde han reaccionado estequiométricamente las cantidades equivalentes de ácido y base.
Punto final	Cambio que se puede observar durante una titulación y que indica que la cantidad de titulante agregado es químicamente equivalente a la del analito presente en la muestra.
Residuo	Materiales que permanecen una vez que ha terminado el proceso mediante incineración, reciclado y compostaje.
Sal	Sólido iónico formado por la reacción de un ácido con una base.
Titulación	Procedimiento por el cual un volumen medido de una solución patrón reacciona con un analito en el punto de equivalencia químico.

Tampón	Se le da ese nombre a las soluciones que tienen la capacidad de “consumir” H^+ y OH^- en cantidades grandes sin experimentar un cambio apreciable en el pH.
Unidad SI	Sistema internacional de medición que utiliza siete unidades básicas. Todas las demás unidades se derivan de estas siete unidades.
Valoración	Procesos de añadir reactivos químicos en incrementos hasta completar la reacción, que se señala por un punto final.
Velocidad	Distancia recorrida por unidad de tiempo; se calcula como el caudal dividido para el área de la sección.
Zona tampón	Área neutra que actúa como barrera protectora separando dos zonas.

7. ABREVIATURAS

ac	Acuoso
ASTM	Sociedad Americana de Normalización de Ensayos y Materiales
AWWA	Asociación Americana de Empresas de Abastecimiento de Agua.
DAM	Drenaje ácido de minería
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días.
DQO	Demanda química de oxígeno
EDAR	Estación depuradora de aguas residuales
DAF	Flotación por aire disuelto.
g	Gas
IUPAC	Abreviatura de la International Union of Pure and Applied Chemistry (Union Internacional de Química Pura) que efectúa recomendaciones sobre nomenclatura química. Al escribir la fórmula química de un compuesto, se escribe primero el cation luego el anión.
Ka	Constante de acidez
Kb	Constante de basicidad
M	Molaridad
M	En alcalinidad representa la alcalinidad obtenida con el indicador mixto
mg	miligramos
n	Número de protones cedidos o donados
NA	Número de avogadro = $6,22 \times 10^23$
P	Equivale a la alcalinidad de la fenolftaleína

Martha Bermeo Garay

Ingeniera Química. Diplomado en Docencia Superior. Magister en Ingeniería Ambiental. Doctorado en Ciencias Ambientales. Docente Principal de la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química, Asignaturas: Ingeniería de Aguas y Medio Ambiente, Ecología, y Tratamiento de Residuos Sólidos. Asesora técnica en Tratamiento de Aguas y aguas residuales.

Stefanie Michelle Bonilla Bermeo,
Ingeniero Química, Magister en Procesamiento y Conservación de Alimentos. Docente de la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química, carrera de Ingeniería Química, Asignaturas Cinética de Reacciones y Sistemas de Calidad. Coordinadora de Maestría de Alimentos

Tony Wellington Coloma Coloma

Ingeniero Químico. Diploma En Diseño Curricular Universidad de Guayaquil. Maestría En Docencia Superior Y Gerencia Educativa Universidad de Guayaquil. Docente de Laboratorio de Física y de Metodología de la Investigación en la Facultad de Ingeniería Química. Carrera Ingeniería Química
Jefe de Esterlin products. Gerente Ediciones Coloma.
Gerente Artes Gráficas Coloma

ISBN: 978-9942-760-49-4



9 789942 760494