



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

DETERMINACIÓN DE CURVAS DE CONSUMO DE CAL EN PROCESAMIENTO DE
MINERALES MEDIANTE EL USO DE UN MOLINO MAGOTTEAUX

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

SANTIAGO PATRICIO OLIVA PEIRANO

PROFESOR GUÍA:
WILLY KRACHT GAJARDO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MELANIE COLET LAGRILLE
TOMÁS VARGAS VALERO

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil Químico
POR: Santiago Patricio Oliva Peirano
FECHA: 11 de Diciembre de 2019
PROFESOR GUÍA: Willy Kracht Gajardo

DETERMINACIÓN DE CURVAS DE CONSUMO DE CAL EN PROCESAMIENTO DE MINERALES MEDIANTE EL USO DE UN MOLINO MAGOTTEAUX

La industria minera en Chile, la cual representa un 10% del PIB del país para el año 2018 y en el último trimestre del mismo año creció un 4.8%, siendo fundamental dentro de la economía Chile. Se resaltan dos etapas de la producción de cobre que son la molienda y la flotación. En ese contexto, una empresa solicita profundizar el entendimiento químico de la molienda a partir de estudiar las curvas de consumo de cal ajustando el pH después de moler, como se hace en laboratorio, o controlando el pH durante el proceso, asemejándose la industria.

Se elabora un marco conceptual, resaltando que las variables fisicoquímicas de lo que ocurra durante la molienda van a depender de las reacciones óxido/reducción y de la interacción agua roca a medida que se liberen las especies. Además, se utilizará un molino Magotteaux que permite la medición en línea de las variables fisicoquímicas y controlarlas.

Metodológicamente se comienza elaborando la cinética de molienda. Luego se mide el consumo de cal considerando dos escenarios: ajustar el pH después de la molienda y controlar el pH durante la molienda. En los experimentos con control de pH se mide también la tasa de consumo de cal. Finalmente se analizan las muestras con QEMScan con el fin de advertir las principales reacciones esperadas. Los experimentos se realizaron con tres unidades geológicas distintas.

Como resultados principales se obtiene, en primer lugar, que existe una relación lineal entre la tasa en que se expone la superficie del mineral con el consumo de cal en el tiempo, con un coeficiente de Pearson cercano a 0,98 y, en segundo lugar, que el consumo de cal al controlar el pH durante la molienda es menor comparado al ajustarlo posterior a esta. El primer resultado es el esperado, clarificando que el cambio del pH depende de las reacciones superficiales. El segundo resultado se explica por la disminución del efecto galvánico en los medios de molienda y la menor formación de hidróxido de hierro. Finalmente, al analizar las muestras se encuentra una presencia preponderante de feldespatos, arcilla, cuarzo, calcopirita, pirita, silicatos y filosilicatos.

Se logra analizar el consumo de cal en los dos escenarios, presentando una posible sobreestimación de consumo de cal de entre 6% a un 50% al ajustar pH después del proceso. Además, se concluye que son las interacciones agua-roca las que definen la reactividad dentro de la molienda, siendo un factor por profundizar en futuros estudios. Cumpliéndose entonces el objetivo de tener un mejor entendimiento de la molienda a partir de las curvas de consumo de cal. Se recomienda para nuevas investigaciones tener un conocimiento de la mineralogía posterior a la molienda y cómo afecta en la flotación, junto a evaluar la posibilidad de la implementación de un modelo matemático que sea capaz de determinar el consumo de cal según las especies presentes. Finalmente, se recomienda evaluar el consumo de cal en laboratorio controlando el pH para poseer un comportamiento más cercano a la industria y evitar posibles sobreestimaciones.

*A mi madre y mis amigos
que me han acompañado siempre*

Quiero agradecer, en primer lugar, a mi familia, por su acompañamiento constante y la sensación de seguridad a prueba de todo que me han brindado siempre. No estaría donde estoy si no fuese por ustedes, y les agradezco por hacerme parte de un equipo a donde damos cara a todo en la vida. En esto también incluyo a mi familia extendida, que me recuerdan que la sangre no importa para quererse y acompañarse.

Los proyectos en que fui parte y me formaron para la persona que quiero ser en el futuro. La FONGSP que me enseñó a soñar, crear equipos de trabajo y la ambición de hacer cosas que no a todos les hace sentido. La comisión Docencia y Bienestar fue el principal espacio de hacer política, y en ella obtuvimos lindos resultados que espero que mejoren la vida normal de los estudiantes. El CEI 2017 es para mí el símbolo que se puede hacer política sin necesidad de centrarse en ganar, sino que en servir. Agradezco haber formado parte de dichos proyectos, así como también de scout con las y los jóvenes que me acompañaron cada sábado, era cansador, pero rellenaba de energía. También a mi militancia política, porque obvio que teníamos que ser un movimiento pequeño pero que dimos cara durante mucho tiempo.

Resaltar a mis amigos y amigas que me acompañaron en todo este tiempo y me enseñaron a ser feliz y a hacer de esta normalidad una terraza donde estar. Por mi personalidad son muchas esas personas, así que pido desde ya perdón a quienes se me olviden. A los de los primeros años y descubrimos la universidad (La Fran buena, la Jas, la Anto, el Perry, la Gaby, la Dani, la Karen, el Yasser, el JP, el Esteban, la Cami, la Cony, el Claudio, el Diego, entre otros), a quienes me acompañaron en proyectos y quedará el cariño para siempre (Maika, Vale, Caro, Aurora, Cami, el Pedro, el Foncho, el Iván, la Monse, el Fabian y todo el CEI). Finalmente, dentro de los amigos y amigas, están con quienes tuve el privilegio de mantenerme unido durante toda la carrera, quienes aguantaron mi egoísmo de meterme a cada cargo de encontré y me apoyaron para crecer a la persona que soy. Gracias a la Flo, a la Gatu, al Nico Zalduendo, al Diego, al Felipe Murillo, el Yasser, el Felipemo y al Andrés Cueto.

Siempre dar gracias a los profesores, que me han acompañado para llegar a donde estoy, a todos los del colegio y de la universidad. A los profesores que me tocó discutir por algún protocolo y a los profesores que apoyaron las iniciativas que planteábamos. A los profesores de humanidades que intentan que los estudiantes piensen. En especial quiero agradecer al profesor Willy por permitirme hacer la tesis con él y a mi “jefe” el Gonzalo junto a la gran oficina 203.

No puedo dejar de lado agradecer al motor social que me motivó a seguir estudiando y darle algún sentido a las noches de estudio. Es raro agradecerle a un ente abstracto, pero esta motivación no sería la misma sin quienes salieron a la calle a pedir un Chile más justo, quienes sacrificaron su bienestar físico para decirle al gobierno que Chile quiere más, para decirle a nuestra gente que en nosotros está el cambio y que debemos servir para ser agentes de nuestra sociedad. Así que a quienes sueñen por justicia, por una democracia real, por una forma de vida que sea respetuosa del medio ambiente, por una sociedad en que todos quepamos, a todas esas personas, les agradezco porque nos seguiremos viendo.

Finalmente agradezco al club social y deportivo Colo-Colo, por ser motivo de alegrías en todos estos años. Una mención especial a Luis Mena, por demostrar que con esfuerzo se llega a todas partes, y a Esteban Paredes, que me daba alegrías mientras avanzaba en este proyecto.

Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1	Minería de cobre en Chile.....	1
1.2	Rol de la cal en la obtención de cobre	2
1.3	Consumo de cal en el proceso de molienda.....	2
1.4	Motivación y descripción del proyecto.....	3
1.5	Objetivos.....	3
1.5.1	Objetivos generales.....	3
1.5.2	Objetivos específicos.....	3
1.5.3	Alcances.....	4
1.6	Estructura informe	4
2.	Marco conceptual	6
2.1	Relación química entre molienda y flotación	6
2.2	Molienda	8
2.2.1	Formatos de molienda	8
2.2.2	Interacción mineral con medios de molienda.....	8
2.3	Fenómenos físicos de la molienda.....	10
2.3.1	Liberación.....	10
2.3.2	Determinación de p80 y cinética de molienda.....	11
2.4	Fenómenos químicos de la molienda.....	12
2.4.1	Formación de acuosos y precipitación.....	13
2.4.2	Reacciones REDOX	13
2.5	Curvas de consumo de cal y comportamiento en agua de mar	15
2.5.1	Elaboración de curvas mediante método tradicional.....	17
2.5.2	Elaboración de curvas mediante molino Magotteaux.....	17
2.6	Material disponible y condiciones de operación.....	20
3.	Metodología.....	22
3.1	Preparación del material	23
3.2	Análisis de muestras	23
3.3	Cinética de molienda	24
3.4	Preparación de agua.....	24
3.5	Elaboración de curvas de consumo de cal	25
3.5.1	Elaboración de curvas método tradicional.....	25
3.5.2	Elaboración de curvas mediante molino Magotteaux.....	26
4.	Resultados.....	27

4.1	Análisis de muestras	27
4.1.1	Composición de muestra	27
4.1.2	Principales fenómenos esperados	28
4.2	Preparación de material y cinética de molienda	34
4.3	Curvas de consumo de cal	36
4.3.1	Consumo de cal a través del tiempo	36
4.3.2	Curvas de consumo de cal	37
4.3.3	Comportamiento pH y voltaje en el tiempo.....	43
4.4	Relación entre superficie expuesta y consumo de cal en el tiempo.....	46
5.	Discusiones.....	49
5.1	Validación material y consumo de cal en el tiempo	49
5.2	Relación entre superficie expuesta y consumo de cal en el tiempo.....	49
5.3	Curvas de consumo de cal	50
6.	Conclusión y recomendaciones	54
7.	Bibliografía.....	55
8.	Anexos.....	59
8.1	Anexo Preparación de material.....	59
8.1.1	Preparación de material: Metodología.....	59
8.1.2	Preparación de material: Resultados.....	61
8.2	Anexo Cinética de molienda.....	66
8.2.1	Cinética de molienda: Metodología.....	66
8.2.2	Cinética de molienda: resultados.....	68
8.3	Anexo Preparación de agua	79
8.4	Anexo Elaboración de curvas de consumo de cal.....	81
8.4.1	Elaboración de curvas de consumo de cal: Metodología	81
8.4.2	Elaboración de curvas mediante molino Magotteaux.....	82
8.4.3	Elaboración de curvas de consumo de cal: Resultados	83
8.5	Anexo Análisis de muestras.....	142
8.6	Anexo Ajuste lineal	148

Índice de tablas

Tabla 1 Condiciones de operación molino Magotteaux	20
Tabla 2 Medios de molienda seleccionados	20
Tabla 3 Composición agua utilizada en empresa minera	24
Tabla 4 Concentración sales requeridas preparación de solución	25
Tabla 5 Distribución modal por muestra	27
Tabla 6 Principales elementos presentes	28
Tabla 7 Resumen elaboración muestras experimentos	34
Tabla 8 Tiempos de molienda finales malla #200	36
Tabla 9 Resumen consumo de cal medios de acero	43
Tabla 10 Resumen consumo de cal medios cromados	43
Tabla 11 pH de pulpa post molienda	43
Tabla 12 Resumen ajuste lineal pH 11	47
Tabla 13 Resumen ajuste lineal pH 10,5	47
Tabla 14 Resumen ajuste lineal pH 10	47
Tabla 15 Resumen ajuste lineal pH 9,5	48
Tabla 16 Tamices a utilizar distribución granulométrica	61
Tabla 17 Resumen distribución muestras	64
Tabla 18 Distribución granulométrica M1 8 minutos	68
Tabla 19 Distribución granulométrica M1 11 minutos	68
Tabla 20 Distribución granulométrica M1 15 minutos	69
Tabla 21 Distribución granulométrica M1 20 minutos	69
Tabla 22 Distribución granulométrica M2 8 minutos	70
Tabla 23 Distribución granulométrica M2 11 minutos	70
Tabla 24 Distribución granulométrica M2 15 minutos	71
Tabla 25 Distribución granulométrica M2 20 minutos	71
Tabla 26 Distribución granulométrica M3 8 minutos	72
Tabla 27 Distribución granulométrica M3 11 minutos	72
Tabla 28 Distribución granulométrica M3 15 minutos	73
Tabla 29 Distribución granulométrica M3 20 minutos	73
Tabla 30 P80 a distintos tiempos de molienda M1	74
Tabla 31 P80 a distintos medios de molienda M2	74
Tabla 32 P80 a distintos tiempos de molienda M3	74
Tabla 33 Tiempo de molienda aproximado proceso cinética de molienda	75
Tabla 34 Composición granulométrica M1 14 minutos y 47 segundos	75
Tabla 35 Composición granulométrica M2 13 minutos y 22 segundos	76
Tabla 36 Distribución granulométrica M3 13 minutos y 7 segundos	76
Tabla 37 P80 a distintos tiempos de molienda quintos puntos	77
Tabla 38 Tiempos propuestos de molienda	79
Tabla 39 Tiempos de molienda por UG	79
Tabla 40 Principales elementos presentes en agua de mar desalinizada	80
Tabla 41 Sales disponibles para experimentos	80
Tabla 42 Concentraciones preliminares elaboración de agua	80
Tabla 43 Sales disponibles	81
Tabla 44 Receta elaboración agua de mar desalinizada sintética	81
Tabla 45 Medición peso solución de cal en el tiempo M1 pH 9,5 v1	83
Tabla 46 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 9,5 v1	85

Tabla 47 Curva consumo de cal controlando parámetros M1 v1	104
Tabla 48 Curva de consumo de cal controlando parámetros M1 v2	104
Tabla 49 Curva de consumo de cal controlando parámetros M2 v1	104
Tabla 50 Curva de consumo de cal controlando parámetros v2.....	105
Tabla 51 Curva de consumo de cal controlando parámetros M3 v1	105
Tabla 52 Curva de consumo de cal controlando parámetros M2 v2	105
Tabla 53 Curva de consumo de cal controlando parámetros M1 medios cromados	105
Tabla 54 Curva de consumo de cal controlando parámetros M2 medios cromados	106
Tabla 55 Curva de consumo de cal controlando parámetros M3 medios cromados	106
Tabla 56 Curva de consumo de cal método tradicional M1	107
Tabla 57 Curva de consumo de cal método tradicional M2.....	108
Tabla 58 Curva de consumo de cal método tradicional M3	109
Tabla 59 Curva de consumo de cal método tradicional M1 medios cromados.....	110
Tabla 60 Curva de consumo de cal método tradicional M2 medios cromados.....	111
Tabla 61 Curva de consumo de cal M3 medios cromados.....	111
Tabla 62 Resumen presencia minerales QEMSCAN.....	142
Tabla 63 Distribución modal minerales QEMSCAN.....	143
Tabla 64 Presencia cobre en unidades geológicas.....	144
Tabla 65 Estado de liberación calcopirita.....	144
Tabla 66 Estado liberación pirita.....	144
Tabla 67 Presencia de arcilla en unidad geológica.....	147
Tabla 68 Resumen ajuste lineal pH 11	155
Tabla 69 Resumen ajuste lineal pH 10,5	155
Tabla 70 Resumen ajuste lineal pH 10	155
Tabla 71 Resumen ajuste lineal pH 9,5	155

Índice de figuras

Figura 1 Proceso de obtención de cobre [4]	1
Figura 2 Recuperación calcopirita según pH [13]	6
Figura 3 Recuperación pirita según pH [13]	7
Figura 4 Recuperación por fracción de tamaño caso caolinita [14]	7
Figura 5 Oxidación de acero en presencia de calcosina (Cu_2S) [19].....	9
Figura 6 Oxidación de acero en presencia de pirita (Fe_2S) [19].....	9
Figura 7 Interacción galvánica [19].....	10
Figura 8 pH vs Eh de Fe-O-H [34].....	14
Figura 9 Curvas de consumo de cal [13]	16
Figura 10 Molino de bolas tradicional a escala de laboratorio [42]	17
Figura 11 Operación molino Magotteaux [8].....	18
Figura 12 Interior molino Magotteaux con medios de molienda	18
Figura 13 Separación de espacios para medición de parámetros molino Magotteaux.....	19
Figura 14 Vista exterior molino Magotteaux preparado para medición de parámetros y recirculación	19
Figura 15 Diagrama resumen metodología	22
Figura 16 Diagrama Eh vs pH Cu-Fe-S [47].....	29
Figura 17 Diagrama Eh-pH de Fe – S [49].....	29
Figura 18 Efecto galvánico en la presencia de un mineral sulfurado [53]	32
Figura 19 Efecto galvánico en la presencia de dos minerales sulfurados [54].....	32
Figura 20 Cinética de molienda M1	34
Figura 21 Cinética de molienda M2	35
Figura 22 Cinética de molienda M3	35
Figura 23 Consumo de cal en el tiempo durante molienda medios de acero M3 pH v2.....	37
Figura 24 Curvas consumo de cal M1 medios de acero	37
Figura 25 Curvas consumo de cal M2 medios de acero	38
Figura 26 Curvas de consumo de cal M3 medios de acero	38
Figura 27 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios de acero v1	39
Figura 28 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios de acero v2	39
Figura 29 Comparación curvas de consumo de cal método tradicional	40
Figura 30 Curvas de consumo de cal M1 medios cromados	40
Figura 31 Curvas de consumo de cal M2 medios cromados	41
Figura 32 Curvas de consumo de cal M3 medios cromados	41
Figura 33 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios cromados	42
Figura 34 Comparación curvas de consumo de cal método tradicional	42
Figura 35 pH y voltaje en el tiempo M1 pH 10 v2.....	44
Figura 36 pH y voltaje en el tiempo M1 pH 11 v1.....	44
Figura 37 pH y voltaje en el tiempo M2 sin control pH v1.....	45
Figura 38 pH y voltaje en el tiempo M3 medios cromados pH 11.....	46
Figura 39 Relación superficie expuesta vs cal M1 pH 11	47
Figura 40 Laboratorio a escala de laboratorio.....	59
Figura 41 Ejemplo selección capachos cortador rotatorio.....	60
Figura 42 Peso muestras M1	62
Figura 43 Peso muestras M2	63

Figura 44 Peso muestras M3	64
Figura 45 Distribución granulométrica M1	65
Figura 46 Distribución granulométrica M2	65
Figura 47 Distribución granulométrica M3	66
Figura 48 Cinética de molienda M1	77
Figura 49 Cinética de molienda M2	78
Figura 50 Cinética de molienda M3	78
Figura 51 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 9,5 v1	86
Figura 52 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 9,5 v2	86
Figura 53 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 10 v1	87
Figura 54 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 10 v2	87
Figura 55 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 10,5 v1	88
Figura 56 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 10,5 v2	88
Figura 57 Consumo de cal durante el tiempo M1 pH 11 v1	89
Figura 58 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 11 v2	89
Figura 59 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 9,5 v1	90
Figura 60 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 9,5 v2	90
Figura 61 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 10 v1	91
Figura 62 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 10 v2	91
Figura 63 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 10,5 v1	92
Figura 64 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 10,5 v2	92
Figura 65 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 11 v1	93
Figura 66 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 11 v2	93
Figura 67 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 9,5 v1	94
Figura 68 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 9,5 v2	94
Figura 69 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 10 v1	95
Figura 70 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 10 v2	95
Figura 71 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 10,5 v1	96
Figura 72 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 10,5 v2	96
Figura 73 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 11 v1	97
Figura 74 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 11 v2	97
Figura 75 Consumo de cal en el tiempo M1 medios cromados pH 9,5	98
Figura 76 Consumo de cal en el tiempo M1 medios cromados pH 10	98
Figura 77 Consumo de cal en el tiempo M1 medios cromados pH 10,5	99
Figura 78 Consumo de cal en el tiempo M1 medios cromados pH 11	99
Figura 79 Consumo de cal en el tiempo M2 medios cromados pH 9,5	100
Figura 80 Consumo de cal en el tiempo M2 medios cromados pH 10	100
Figura 81 Consumo de cal en el tiempo M2 medios cromados pH 10,5	101
Figura 82 Consumo de cal en el tiempo M2 medios cromados pH 11	101
Figura 83 Consumo de cal en el tiempo M3 medios cromados pH 9,5	102
Figura 84 Consumo de cal en el tiempo M3 medios cromados pH 10	102
Figura 85 Consumo de cal en el tiempo M3 medios cromados pH 10,5	103
Figura 86 Consumo de cal en el tiempo M3 medios cromados pH 11	103
Figura 87 Curvas consumo de cal M1 medios de acero	112
Figura 88 Curvas de consumo de cal M2 medios de acero	112
Figura 89 Curvas de consumo de cal M3 medios de acero	113
Figura 90 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios de acero v1	113

Figura 91 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios de acero v2	114
Figura 92 Comparación curvas de consumo de cal método tradicional	114
Figura 93 Curvas de consumo de cal M1 medios cromados	115
Figura 94 Curva de consumo de cal M2 medios cromados.....	115
Figura 95 Curvas de consumo de cal M3 medios cromados	116
Figura 96 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios cromados	116
Figura 97 Comparación curvas de consumo de cal método tradicional	117
Figura 98 Oxígeno disuelto en el tiempo M1 pH 11 v2	118
Figura 99 Medición de parámetros M1 sin control pH v1	118
Figura 100 Medición de parámetros M1 sin control pH v2	119
Figura 101 Medición parámetros M1 pH 9,5 v1	120
Figura 102 Medición parámetros M1 pH 9,5 v2	120
Figura 103 Medición parámetros M1 pH 10 v1	121
Figura 104 Medición parámetros M1 pH 10 v2	121
Figura 105 Medición parámetros M1 pH 10,5 v1	122
Figura 106 Medición parámetros M1 pH 10,5 v2	122
Figura 107 Medición parámetros M1 pH 11 v1	123
Figura 108 Medición parámetros M1 pH 11 v2	124
Figura 109 Medición parámetros M2 sin control pH v1	125
Figura 110 Medición parámetros M2 sin control pH v2	125
Figura 111 Medición parámetros M2 pH 9,5 v1	126
Figura 112 Medición parámetros M2 pH 9,5 v2	126
Figura 113 Medición parámetros M2 pH 10 v1	127
Figura 114 Medición parámetros M2 pH 10 v2	127
Figura 115 Medición parámetros M2 pH 10,5 v1	128
Figura 116 Medición parámetros M2 pH 10,5 v2	128
Figura 117 Medición parámetros M2 pH 11 v1	129
Figura 118 Medición parámetros M2 pH 11 v2	129
Figura 119 Medición parámetros M3 sin control pH v1	130
Figura 120 Medición parámetros M3 sin control pH v2	130
Figura 121 Medición parámetros M3 pH 9,5 v1	131
Figura 122 Medición parámetros M3 pH 9,5 v2	131
Figura 123 Medición parámetros M3 pH 10 v1	132
Figura 124 Medición parámetros M3 pH 10 v2	132
Figura 125 Medición parámetros M3 pH 10,5 v1	133
Figura 126 Medición parámetros M3 pH 10,5 v2	133
Figura 127 Medición parámetros M3 pH 11 v1	134
Figura 128 Medición parámetros M3 pH 11 v2	134
Figura 129 Medición parámetros M1 medios cromados pH 9,5	135
Figura 130 Medición parámetros M1 medios cromados pH 10	135
Figura 131 Medición parámetros M1 medios cromados pH 10,5	136
Figura 132 Medición parámetros M1 medios cromados pH 11	136
Figura 133 Medición parámetros M2 medios cromados pH 9,5	137
Figura 134 Medición parámetros M2 medios cromados pH 10	137
Figura 135 Medición parámetros M2 medios cromados pH 10,5	138
Figura 136 Medición parámetros M2 medios cromados pH 11	138

Figura 137 Medición parámetros M3 medios cromados sin control pH	139
Figura 138 Medición parámetros M3 medios cromados pH 9,5	139
Figura 139 Medición parámetros M3 medios cromados pH 10	140
Figura 140 Medición parámetros M3 medios cromados pH 10,5	140
Figura 141 Medición parámetros M3 medios cromados pH 11	141
Figura 142 Asociación de minerales M1	145
Figura 143 Asociación de minerales M2	146
Figura 144 Asociación de minerales M3	147
Figura 145 Relación lineal M1 pH 9,5	149
Figura 146 Relación lineal M1 pH 10	149
Figura 147 Relación lineal M1 pH 10,5	150
Figura 148 Relación lineal M1 pH 11	150
Figura 149 Relación lineal M2 pH 9,5	151
Figura 150 Relación lineal M2 pH 10	151
Figura 151 Relación lineal M2 pH 10,5	152
Figura 152 Relación lineal M2 pH 11	152
Figura 153 Relación lineal M3 pH 9,5	153
Figura 154 Relación lineal M3 pH 10	153
Figura 155 Relación lineal M3 pH 10,5	154
Figura 156 Relación lineal M3 pH 11	154

1. Introducción

1.1 Minería de cobre en Chile

La producción minera corresponde al 10% del Producto Interno Bruto (PIB) de Chile para el año 2018 [1], convirtiéndose en un factor significativo dentro de la industria nacional. Esto se complementa con lo reportado por el Banco Central que menciona que el rubro ha crecido un 4.8% por el aumento en la producción de cobre y minerales no metálicos [2]. La importancia económica ya mencionada y su potencial crecimiento ha colocado a la industria del cobre como un actor relevante en el país.

El proceso de producción de cobre consiste en la obtención y refinación de este desde la roca en donde se encuentra. Así, dependiendo del tipo de cobre que se encuentre en la mina, podrán existir distintas variaciones en su obtención. En el caso chileno lo más común es trabajar con sulfuro de cobre, más bien conocido como calcopirita (CuFeS_2) [3], provocando que en lo que continúe del informe se basa en ese producto.

A continuación, se relata el proceso general para obtener cobre en Chile [4]. Comienza con su extracción desde la mina y se lleva a chancado para disminuir su tamaño. Después, se lleva a molienda en donde se utilizan bolas de acero y el mismo producto para seguir reduciendo el tamaño. En esta etapa existe un control de pH para que llegue en condiciones ideales a la siguiente etapa que es la flotación, en donde se utilizan burbujas que llevan el cobre a la superficie. De ahí, se lleva a los espesadores y filtrado que recupera y recircula el agua utilizada. El concentrado de cobre puede ser comercializado o continuar refinando. Las opciones para seguir refinando son normalmente refinar a fuego (RAF) o electrólisis, mientras que el residuo es llevado a un depósito de relaves. Lo anterior descrito se muestra en la siguiente imagen [4].

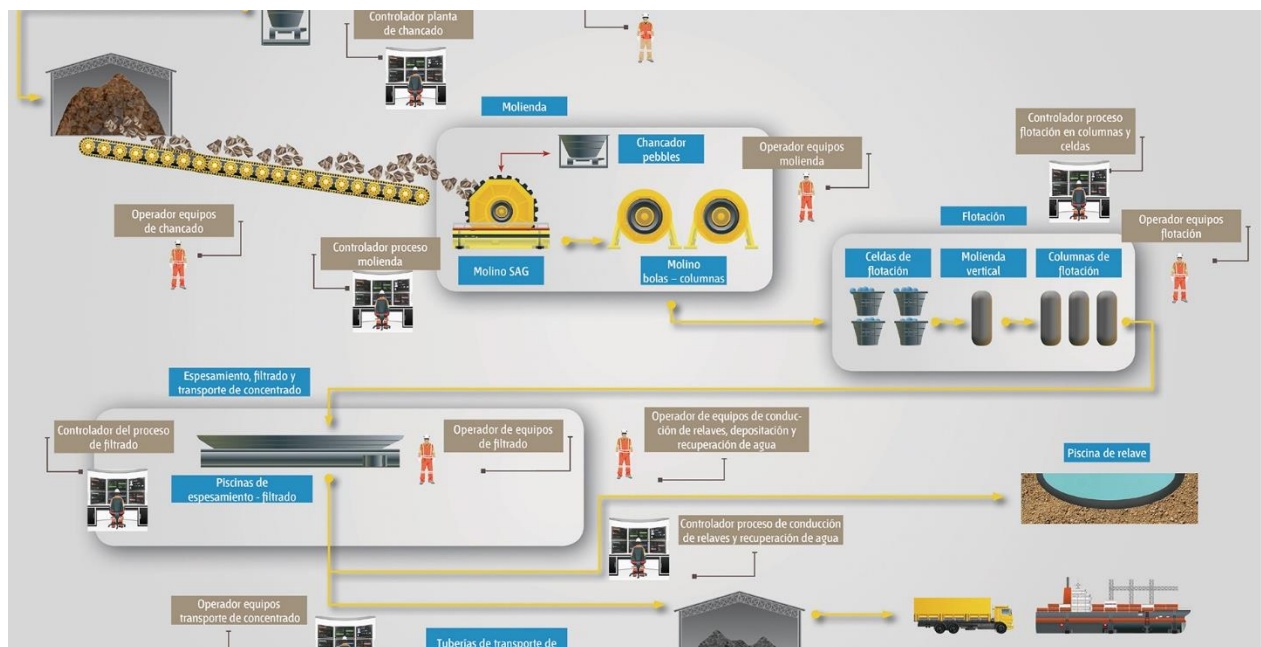


Figura 1 Proceso de obtención de cobre [4]

Un factor para considerar es que cada proceso afecta el siguiente, haciendo necesario tener un seguimiento constante de los parámetros químicos y así poder llevar a cabo de manera eficiente todas las etapas. Un ejemplo de ello es la relación entre la molienda y la flotación, donde se controla el pH y la temperatura mientras se muele para que al momento de flotar la remoción de concentrado de cobre sea óptima [5]. Para motivos del presente informe, se profundizará más adelante sobre los fenómenos de molienda y su implicancia en la flotación.

1.2 Rol de la cal en la obtención de cobre

En el proceso de obtención de cobre existen cuatro insumos clave, estos son: Cal, medios de molienda, reactivos y suministros [5]. En el caso específico de la cal, esta es considerada también como un factor clave en la industria nacional, debido a que un 92% de la producción chilena es utilizada en minería de cobre [6]. Los principales usos del material consiste en la etapa de molienda y flotación, y, en caso de realizarla, fundición de metales [6].

Centrándose en el proceso de flotación, este requiere mantener las condiciones de operación controladas con el fin de optimizar el proceso. Las condiciones a controlar pueden ser pH, diámetro de partícula, oxígeno disuelto, entre otros [7]. Esto es dado, como se profundizará más adelante, influyen en la operación como puede ser en la composición de la burbuja y el tamaño de ella, que están relacionados a la eficiencia del proceso [7].

Con la tecnología actual, se es posible investigar la relación entre la química de la molienda y cómo esta afecta a la flotación, dando herramientas que se profundizarán más adelante en el informe [8].

1.3 Consumo de cal en el proceso de molienda

Como se ha mencionado anteriormente, la molienda es el proceso previo a la flotación, provocando que las variables de salida al moler sean estudiadas con el fin de que se logre concentrar el mayor cobre posible al ser flotado. Actualmente los estudios se han centrado principalmente en el comportamiento químico de la flotación, pero no en la molienda, provocando que se abra un espacio en donde se pueda profundizar en el conocimiento del proceso de obtención de cobre.

Hoy en día se es necesario agregar cal previa a la flotación debido a la necesidad de depreciar la pirita, junto a entregar las condiciones de pH para una correcta formación de la burbuja. Una solución es acondicionar la muestra agregando la cal en un paso intermedio entre la molienda y la flotación, sin embargo, se prefiere agregar la cal durante la molienda debido que el trabajar con pH básico disminuye la oxidación de los medios de molienda [5].

Si bien se agrega la cal durante la molienda, en los experimentos de laboratorio se agrega posterior a esta, existiendo así una varianza procedimental a lo que ocurre en la gran industria, abriendo un espacio de entendimiento y comparar las principales diferencias que puede ocurrir entre lo estimado y la realidad por la metodología utilizada.

1.4 Motivación y descripción del proyecto

Dentro de las tecnologías para el control de procesos en la gran industria está el control de parámetros en la molienda, el cual permite conocer las variables fisicoquímicas de la solución y, en caso de requerirlo, controlarlas. Como fue mencionado en el punto anterior, normalmente la molienda en laboratorio se realiza sin control de parámetros, sin embargo, existe instrumentación que lo permite, en el caso del experimento por realizar, el molino Magotteaux.

El molino Magotteaux permite la medición en línea de distintos parámetros como el oxígeno disuelto (OD), pH, conductividad, temperatura y potencial eléctrico [8]. Su uso ha significado la posibilidad de nuevos estudios, permitiendo aislar variables de operación manteniendo el resto constante, abriendo nuevas puertas de investigación, como la recuperación de cobre modificando solamente el diámetro de partícula [9], medir cómo varía el OD en las otras etapas según las condiciones de operación de la molienda [10] o el efecto de la cal en el voltaje [11]. En fin, abre las puertas a nuevos estudios, dando más variables para optimizar la recuperación de cobre, siendo especial su uso considerando que se encuentra solo 6 de estos equipos operativos en el mundo [8].

Frente al escenario de poder controlar parámetros durante la molienda es que se plantea el estudio de entender de mejor manera su comportamiento químico más que seguir centrándose en las variables físicas que han sido analizado en otros estudios [8].

En el caso del presente proyecto, la empresa minera que solicita el estudio y análisis del consumo de cal durante la molienda, teniendo así un mejor entendimiento del proceso. Es por dicho motivo que solicitan analizar la opción de controlar el pH durante la molienda en vez de como se hace tradicionalmente, enfocado el estudio en mejorar la comprensión de lo que ocurre dentro del molino.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivos generales

Entender de mejor manera el comportamiento químico del proceso de molienda a partir del consumo de cal en el escenario de controlar el pH posterior a la molienda y en el caso de hacerlo durante esta.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Definir metodología de elaboración de curvas de consumo de cal manteniendo variables constantes.
2. Estudiar tasa de consumo de cal durante el tiempo.
3. Comparar curvas de consumo de cal en diferentes escenarios, considerando si esta es agregada durante la molienda o posterior a esta.
4. Analizar y comparar consumo de cal en el tiempo con la superficie específica de material.
5. Analizar resultados y relacionarlos con la caracterización del mineral procesado.
6. Evaluar y elaborar propuestas y/o recomendaciones en bases del análisis anterior.

1.5.3 Alcances

1. El análisis está sujeto a las muestras disponibles para la realización del estudio.
2. El control de parámetros estará sujeto a controlar el pH dentro del rango de 0.1, que es el límite del molino Magotteaux.
3. La evaluación y análisis de resultados se dará en torno a la cal total consumida, la cinética de molienda, la tasa de consumo de cal y composición mineralógica inicial de la muestra.
4. El trabajo busca dejar precedentes en la búsqueda de entender las reacciones químicas en la interacción agua-roca durante la molienda.

1.6 Estructura informe

El informe comienza con el marco conceptual, donde se menciona el motivo del consumo de cal en el proceso de obtención de cobre, pasando luego a los principales fenómenos que ocurren durante la molienda, teniendo los físicos y los químicos. Después se pasa a describir las formas de consumo de cal y finalizando con las condiciones de operación. Se pasa a la metodología experimental detallando cada paso realizado, llegando después a los resultados.

El primer resultado que se tiene es la caracterización de las muestras, Describiendo los principales fenómenos esperados a partir de los compuestos presentes. Los resultados siguientes son del desarrollo experimental, comenzando por la cinética de molienda, pasando al consumo de cal en distintos escenarios y terminando con la comparación del consumo de cal en el tiempo con la superficie expuesta de mineral, la cual es dependiente de la cinética de molienda.

Finalmente, se discute, comenzando con la validación de las muestras, pasando al análisis de consumo de cal en el tiempo, debido que, de existir una relación con la cinética de molienda y la superficie expuesta en el tiempo, genera un precedente para el análisis de las curvas de consumo de cal en diferentes escenarios. Se termina con las conclusiones y recomendaciones. Lo anterior mencionado se puede observar en la siguiente estructura.

2. Marco conceptual

2.1. Relación química entre molienda y flotación

2.2. Molienda

2.3. Fenómenos físicos de la molienda

2.4. Fenómenos químicos de la molienda

2.5. Curvas de consumo de cal

3. Metodología

3.1. Preparación de material

3.2. Análisis de muestras

3.3. Cinética de molienda

3.4. Preparación de agua

3.5. Elaboración de curvas de consumo de cal

4. Resultados

4.1. Análisis de muestras

4.1.1. Composición de muestra

4.1.2. Principales fenómenos esperados

4.2. Preparación de material y cinética de molienda

4.3. Curvas de consumo de cal

4.4. Relación entre superficie expuesta y consumo de cal en el tiempo

5. Discusiones

5.1 Validación material y consumo de cal en el tiempo

5.2. Relación entre superficie expuesta y consumo de cal en el tiempo

5.3. Curvas de consumo de cal

6. Conclusiones y recomendaciones

2. Marco conceptual

2.1 Relación química entre molienda y flotación

Como ya fue presentado, la molienda precede la flotación, existiendo una relación en ambos procesos. El principal objetivo de la molienda es reducir el tamaño del mineral y de esa manera liberar las especies de interés, como la calcopirita. La liberación de los distintos compuestos presentes afecta directamente en la flotación a ocurrir. Ambos procesos ocurren en húmedo, haciendo que las interacciones agua-roca y las propiedades físico-químicas afecten [7].

La flotación consiste en remover los compuestos que poseen cobre y separarlos del resto, obteniendo así concentrado de cobre. El principio del proceso se trata de la adsorción, buscando que el mineral deseado se adhiera a la burbuja inyectada y que esta posea la consistencia y estabilidad suficiente para llegar a la superficie, esperando ser removidas sin reventar. Para la formación de burbujas se pueden agregar aditivos que pueden ser colectores, ayudando a generar la hidrofobicidad necesaria para la adsorción, espumantes que ayudan a la generación y estabilidad de espuma, y modificadores, que mejoran la selectividad del proceso [7].

Sin embargo, se es necesario garantizar la estabilidad química de la flotación con el fin de que la formación de espuma y la obtención de cobre sea en el óptimo de operación. En dicho aspecto aparece, en primer lugar, la liberación de compuestos que reducen la eficiencia del proceso. Ese es el caso de la pirita, la cual también es liberada en la molienda y, al ser removida junto a la calcopirita, provoca que el producto posea menor concentración a la deseada. Ante ello, se busca deprimir la pirita con el fin que no sea removida junto al cobre. La respuesta a la problemática comúnmente utilizada en la industria consiste en aumentar el pH con cal y de esa forma optimizar el consumo de calcopirita, minimizando también la pirita presente [12]. En el siguiente gráfico se presenta el comportamiento la recuperación de calcopirita, mostrada como recuperación de cobre, y la pirita, mostrada como recuperación de hierro, según el pH.

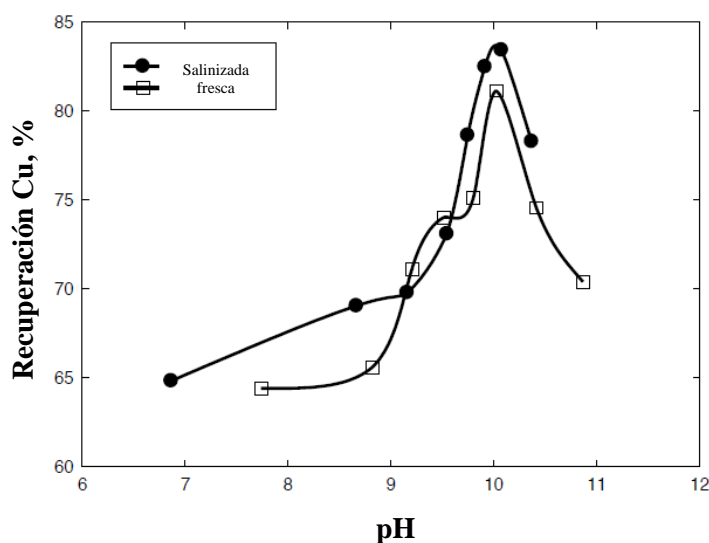


Figura 2 Recuperación calcopirita según pH [13]

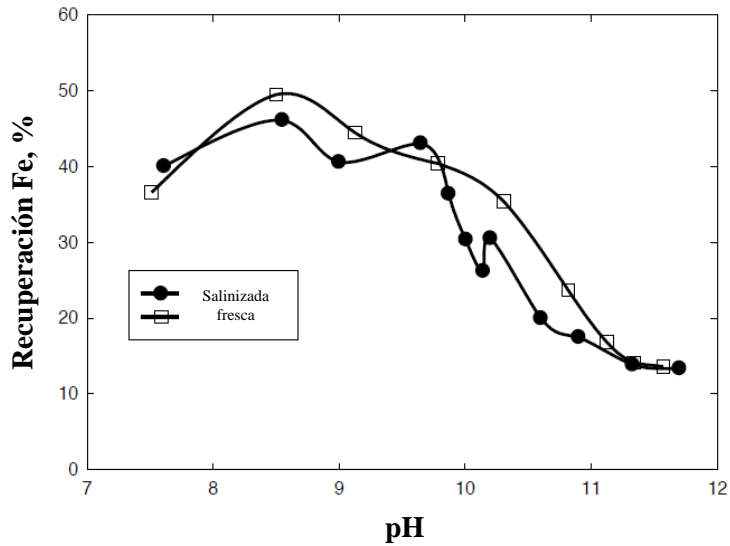


Figura 3 Recuperación pirita según pH [13]

Si bien la pirita es, normalmente, uno de los principales compuestos junto a la magnetita que disminuyen la eficiencia de la flotación, dependerá de la mineralogía de cada yacimiento ver cuales agentes afectarán [12]. En ese aspecto, el diámetro de partícula y la liberación de las especies afectará significativamente en la flotación, dado que, por un lado, se busca liberar los compuestos que poseen el mineral deseado y, por otro lado, liberar la menor cantidad de compuestos que disminuyan la eficiencia del proceso. Esto va junto al factor de ahorrar costos en energía, considerando que un menor tamaño de partícula significa más tiempo de operación. En ese sentido, la molienda influye en la eficiencia [14].

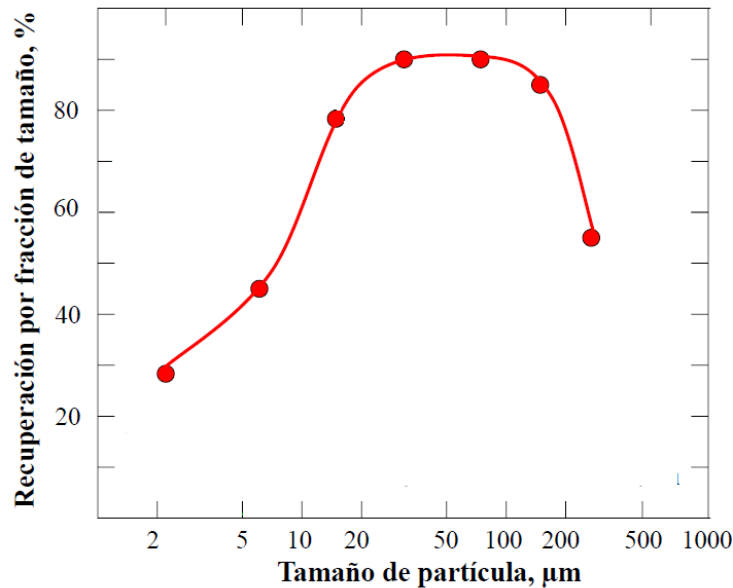


Figura 4 Recuperación por fracción de tamaño caso caolinita [14]

Finalmente, los compuestos presentes en el mineral, como arcillas, feldespatos y cuarzo, pueden afectar en la eficiencia de la flotación y el comportamiento de la formación de la burbuja.

En ese sentido, si bien existe una referencia de qué comportamiento se espera, es necesario estudiar qué puede ocurrir según la mineralogía de cada yacimiento para poder tomar decisiones de operaciones con todas las variables presente.

2.2 Molienda

Para el caso de los cobres sulfurados, es necesario reducir el tamaño de los fragmentos de roca después del chancado, con el fin de que sea más fácil separar los compuestos que poseen cobre de las otras sustancias y obtener mayor pureza [15]. Existen tres tipos fundamentales de molienda: Molienda de barras, Molienda de bolas y Molienda SAG.

2.2.1 Formatos de molienda

La molienda de barra consiste en un equipo cargado con barras de acero de 3,5 pulgadas de diámetro en su interior, las cuales muelen el material proveniente del chancado. El funcionamiento se basa que por rotación la barra sube y luego al llegar a la parte superior cae moliendo el mineral [15], [16].

La molienda de bolas se trata de un molino cargado de bolas que normalmente son de acero de 3,5 pulgadas y un peso de 3 kilos. Similar al caso de los molinos de barra, los medios de molienda suben por la rotación del equipo y caen formando un efecto cascada y moliendo el mineral. Esta tecnología está desplazando a los molinos de barra, que están quedando en el pasado [15], [17].

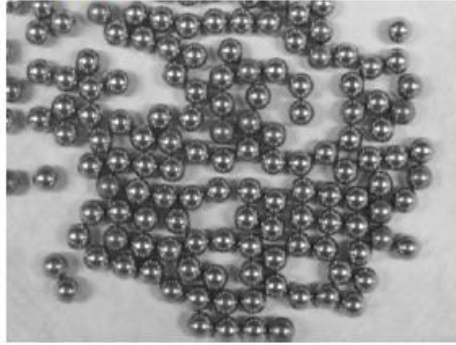
La molienda SAG se trata de un procedimiento más moderno y eficiente de molienda, recibiendo el mineral y lo mezcla con agua y cal. El material se reduce mediante la interacción entre las propias rocas presentes. Normalmente se le agregan bolas de acero para agilizar el proceso. Este mecanismo es más efectivo y con menor consumo de energía comparado al molino de bolas o a la molienda de barra [15], [18].

Los principales mecanismos utilizados en la industria en la actualidad son la molienda SAG y molienda de bolas, implementándose ambos y provocando que los estudios y desarrollo se centren en el análisis de esos procesos [3], [15].

2.2.2 Interacción mineral con medios de molienda

Las bolas de acero reaccionan oxidándose durante la molienda, esto es debido a las reacciones Óxido-Reducción (REDOX) que ocurren constantemente. El nivel de desgaste variará según el producto que se encuentre moliendo [19].

Acero fresco



Acero luego de moler Calcosina

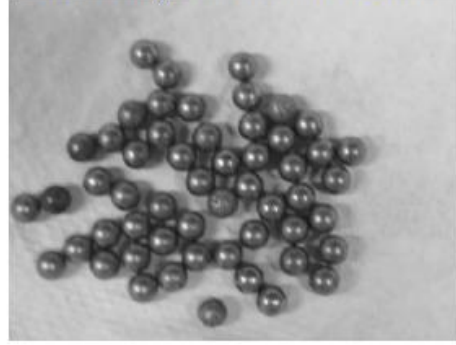
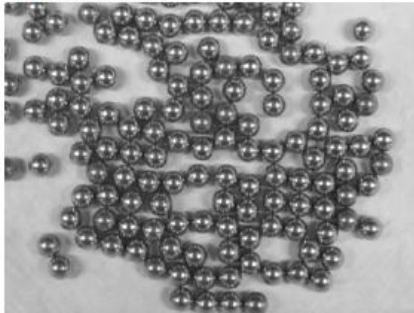


Figura 5 Oxidación de acero en presencia de calcosina (Cu_2S) [19]

Acero fresco



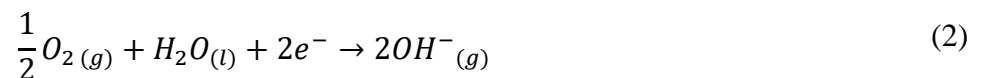
Acero luego de moler Pirita



Figura 6 Oxidación de acero en presencia de pirita (Fe_2S) [19]

La mayor oxidación observada al interactuar el acero con la pirita se debe a las interacciones galvánicas, en donde el mineral, en este caso la pirita, facilitan la oxidación del hierro [20].

Considerando que las principales reacciones REDOX que afectan al acero están dadas por la oxidación del hierro y la reducción del oxígeno con agua dadas por las siguientes ecuaciones [21].



La interacción galvánica ocurre cuando el acero se oxida y el oxígeno se reduce sobre la superficie de la pirita como muestra la siguiente imagen [19].

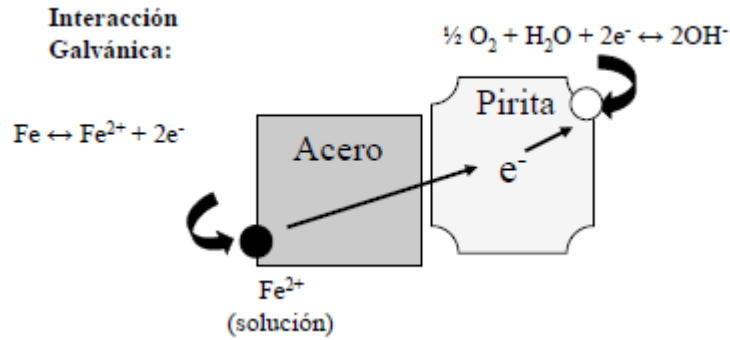
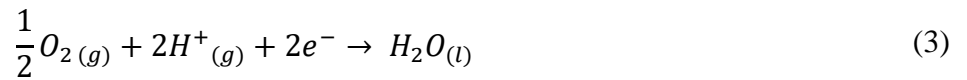


Figura 7 Interacción galvánica [19]

Si se complementa con que el agua también puede reaccionar generando hidrógeno [21].



Se puede afirmar que el pH del ambiente los medios de molienda si afecta su oxidación, dado que influye en el equilibrio del agua y en la reducción de la pirita para que ocurra la interacción galvánica. Los distintos fenómenos que ocurren durante la molienda, incluyendo las interacciones galvánicas y las reacciones REDOX, principalmente que el aumento del pH provocará un ambiente reductor como se profundizan más adelante.

2.3 Fenómenos físicos de la molienda

2.3.1 Liberación

Se entiende como liberación al fenómeno de aumentar el área expuesta del mineral con el objetivo de que las especies de interés se expongan y de esa manera sea posible su concentración futura. Además, se le denomina grado de liberación a la magnitud de liberación de cada partícula mineral con respecto al área total de partícula expuesta [22].

Al liberarse el compuesto, es decir, al verse expuesto, provoca que pueda reaccionar químicamente con el agua, y con ello, con otros minerales, conociéndose el fenómeno como interacciones agua-roca. Actualmente se sabe que dichas interacciones influyen en las variables físico-químicas de la solución, pero aún es necesario conocer cómo el grado de liberación va afectando el comportamiento del pH y el voltaje, o si se pueden deducir las reacciones que ocurren a partir de estas [23], [24].

Los mecanismos para estudiar el grado de liberación de las partículas consisten en el uso de microscopía o QEMScan, obteniendo un conocimiento acabado del mineral trabajado y, en el caso del producto, como se ha liberado los sulfuros con respecto a la ganga, teniendo una estimación de la eficiencia de los procesos por venir [25].

2.3.2 Determinación de p80 y cinética de molienda

Comprendiendo la importancia del grado de liberación de partícula, un criterio comúnmente utilizado en la operación es el tamaño de P80 del mineral. Esto quiere decir, que el diámetro del 80% del producto del proceso se encuentre bajo un valor específico. Considerando que el principal sistema utilizado hoy en día para la estimación de diámetros es el diámetro en malla, se hace necesario modelar matemáticamente con el fin de tener una mayor exactitud.

El diámetro en malla consiste en pasar el material por una malla con orificios de diámetro conocido, reteniendo todo el mineral que sea más grande del tamaño indicado. De esa forma, se conoce la distribución granulométrica de la muestra. Con esa información existen dos modelos más utilizados para modelar el diámetro de partícula, estos son la distribución Gaudin-Shuhman, más utilizada en tamaños finos, y la distribución Rosin-Rammler, más utilizada en tamaños gruesos [26].

Ambas distribuciones mencionadas anteriormente trabajan con la función acumulada de mineral. Se presenta la fórmula de distribución acumulada de Gaudin-Shuhman [26]:

$$F(d) = \left[\frac{d}{d_{m\acute{a}x}} \right]^m \quad (4)$$

en donde

$F(d)$ = *Función de distribución*

d = *Diámetro de partícula*

$d_{m\acute{a}x}$ = *Diámetro máximo*

m = *Parámetro característico*

La función de distribución según Rosin-Rammler es [26]:

$$F(d) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{l} \right)^m \right] \quad (5)$$

donde

$F(d)$ = Función de distribución

d = Diámetro de partícula

l = Diámetro promedio

m = Parámetro característico

Debido a que no existe un criterio único para elegir una de las distribuciones, se utiliza la que ajusta de mejor manera los datos [26].

Una vez conocido el P80, se elabora la cinética de molienda. Esta se construye a partir del P80 del producto frente a distintos tiempos de molienda. Con esos puntos se realiza un ajuste potencial con el fin de generar una curva que represente el valor del P80 según el tiempo de molienda. Finalmente, se determina el tiempo de molienda para llegar al P80 deseado considerando los parámetros del ajuste potencial.

2.4 Fenómenos químicos de la molienda

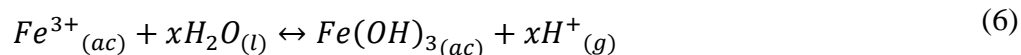
Es posible explicar el comportamiento de la interacción agua-roca dentro del molino a partir de las principales reacciones que puedan ocurrir entre el agua y los minerales presentes. Estas van a depender de la naturaleza de las especies y con qué grado se van liberando en el tiempo.

Dentro de las distintas reacciones que pueden ocurrir está la formación de complejos acuosos, junto a la interacción que poseen los compuestos entre ellos debido a la polarización de estos. Además, la modificación del pH y el potencial eléctrico de la solución provoca que el estado de oxidación de los distintos componentes pueda variar formando nuevos complejos.[27]

Los distintos compuestos formados pueden precipitar o seguir reaccionando dentro del molino. A continuación, se pasará a estudiar algunos de los principales fenómenos que pueden llegar a ocurrir en la molienda.

2.4.1 Formación de acuosos y precipitación

La formación de especies acuosas ocurre al reaccionar un ion con el agua formando un nuevo compuesto. Cuando el potencial de un ion no es lo suficientemente alto, reacciona generando un hidróxido como muestra la reacción [28]:



Los hidróxidos formados o los nuevos compuestos que se generan pueden ser sólidos como el caso del hidróxido férrico, provocando la generación de nuevos elementos en la superficie, los cuales precipitan afectando el equilibrio dentro de la solución.

La formación de acuosos y su reactividad posterior va a depender de los principales iones disueltos. Ejemplo de iones con potencial fuerte es el arsénico, mientras que el cobalto o el manganeso generarán hidróxidos y protones libres [28].

2.4.2 Reacciones REDOX

En el proceso de molienda también ocurren reacciones REDOX que afectan el potencial y pH de la solución, haciendo que se pueda interpretar que pueda estar ocurriendo dentro del molino.

Actualmente en la industria, el potencial eléctrico es utilizado para la determinación de metales disueltos a partir de la ecuación de Nernst [29], donde el nivel de exactitud en la determinación de concentración molar dependerá del nivel de interferencia en el fluido, esto puesto que en las soluciones a controlar hay otros iones que influyen en el valor del potencial medido [30].

Para lograr medir el voltaje y poder determinar los principales iones disueltos es necesario considerar la interferencia que generan los otros iones presentes [29]:

$$E = E_0 - 2,303 \cdot \frac{R \cdot T}{n_i \cdot F} \cdot \log \left(a_i + \sum_{a_j \neq a_i} K_{is} \cdot a_j^{\frac{n_i}{n_s}} \right) \quad (7)$$

donde

$$n_i = \text{Carga eléctrica del ion a medir}$$

$$n_s = \text{Carga eléctrica del ion que hace interferencia}$$

$$a_i = \text{Actividad del ion a medir} \left[\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right]$$

$$a_j = \text{Actividad ion que hace interferencia} \left[\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right]$$

$$K_{is} = \text{Constante de selectividad (Ion a medir vs ion interferencia)} \left[\left(\frac{\text{L}}{\text{mol}} \right)^{\frac{n_s}{n_i}} \right]$$

Las constantes de selectividad se miden empíricamente según la solución con que se trabaja y las interferencias que existan, están tabuladas entregando el rango se encuentran [31] y hay métodos estandarizados con el fin de encontrar su valor exacto [32].

Una posibilidad frente a la interferencia de otros iones es la utilización de Electrodo Ion Selectivos (ISE por su sigla en inglés), que tienen la posibilidad de aplicar la ley de Nernst directamente sin la necesidad de controlar los otros metales [32], sin embargo, para cada ISE hay elementos específicos que pueden interferir en la medición [33], factor que se debe tener presente si se desean utilizar en zonas con varios iones disueltos.

Para los experimentos a realizar se utilizarán electrodos tradicionales que mide el pH sin considerar las posibles interferencias, entregando una noción de qué puede haber presente en la solución, pero sin precisión exacta para poder concluir en torno al tema.

Una herramienta a utilizar para estimar el comportamiento dentro del molino son los diagramas Eh vs pH, las cuales indican de qué forma se reduce u oxida el compuesto ante los distintos escenarios, un ejemplo es el hierro disuelto en una solución acuosa [34].

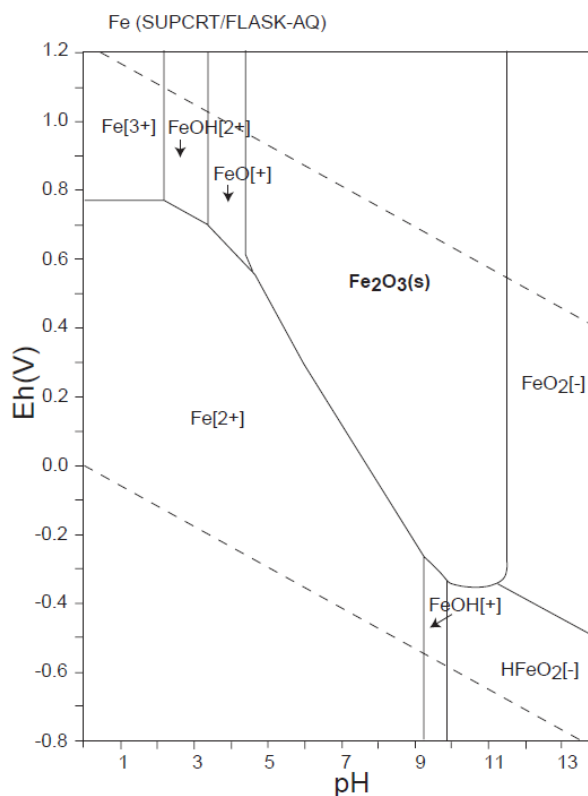


Figura 8 pH vs Eh de Fe-O-H [34]

En ese ejemplo, el hierro se encontrará principalmente en forma de Fe^{2+} , pero al aumentar el pH puede cambiar a hematita (Fe_2O_3). Si bien estas tablas entregan una noción de lo que puede ocurrir, no considera todas las reacciones en paralelo que interfieren en la formación de los compuestos mostrados.

Otro aspecto de las reacciones REDOX es el efecto galvánico que acelera la oxidación natural de los medios de molienda, significando un mayor desgaste de estos.

La interacción galvánica es uno de los factores electroquímicos más significativos que ocurren en la molienda, donde influye los sulfuros disueltos en el sistema hidrometalúrgico [35]. Los sulfuros pueden llegar a cumplir el rol de semiconductores, provocando durante la molienda conductividad al estar en contacto con el mineral y los medios de molienda, generando lo llamado “dupla galvánica”. El fenómeno mencionado aumenta la disolución de iones férricos provenientes de los medios de molienda por la reacción mostrada en Figura 7, los cuales tienden a precipitar en forma de hidróxido férrico en la superficie de los minerales sulfurados [35].

El nivel de reactividad provocado por el efecto galvánico va a depender de múltiples variables, como el material de los medios de molienda, los minerales presentes, composición granulométrica del mineral, pH, temperatura, entre otros. Provocando que se estudie en cada caso el nivel de reactividad [36].

Varios estudios corroboran no solo que el efecto galvánico acelera el desgaste de los medios de molienda, sino que además disminuye la eficiencia de la flotación futura, siendo la pirita y la calcopirita uno de los agentes más comunes [37]. Si bien es un factor de estudio cuánto desgasta cada variable, estudios han arrojado que influyen de manera cuadrática con una mayor preponderancia de la tenacidad del material, luego la temperatura de operación, el tiempo de operación y finalmente el pH [38].

2.5 Curvas de consumo de cal y comportamiento en agua de mar

Las curvas de consumo de cal muestran la cal necesaria para llegar a cada nivel de pH, estas se calculan en relación peso a peso (g de cal/kg de mineral) y son utilizadas para estimar los recursos de operación al dimensionar una planta de mayor tamaño. La medición de pH se realiza desde el natural de la pulpa molida [39].

Una curva de consumo posee normalmente una forma creciente, donde a medida que crece el pH, aumenta la cal necesaria. Sin embargo, no siempre es lineal, esto es debido a la posible presencia de metales disueltos que actúan de “buffer” para el cambio del pH, haciendo que a medida que crece la cantidad de cal necesaria, no aumente significativamente el pH [13], [39]. Un ejemplo de ello es comparar las curvas de consumo de cal entre un mineral disuelto en agua de pozo y en agua de mar, donde existe un mayor consumo para el segundo caso [13].

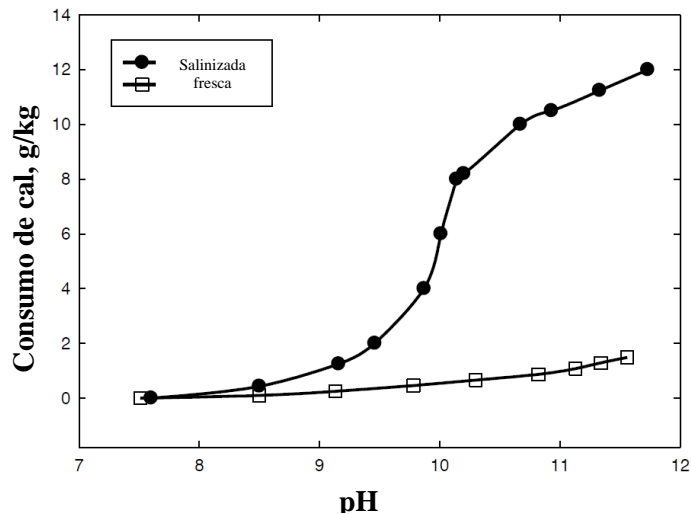
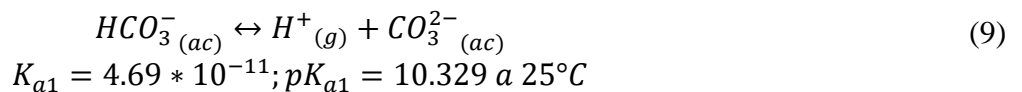
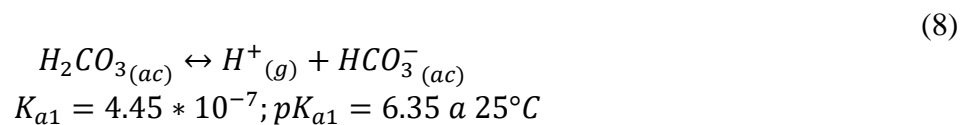


Figura 9 Curvas de consumo de cal [13]

Las curvas de consumo de cal no serán las mismas para todas las muestras, sino que variarán según el tipo de mineral. Son las reacciones entre los compuestos presentes en la roca lo que hace variar el pH durante la molienda y provoca que en distintos escenarios sea necesario agregar diferentes concentraciones de cal. Lo anterior mencionado provoca que se estudie las curvas en función de los metales disueltos o el medio en el cual están disueltos. En el caso de trabajar con agua marina, se detecta un efecto buffer que aumenta la cal deseada a medida que se acerca a pH 10 [40], [41].

Profundizando en el caso del agua de mar y su efecto buffer, se sabe que su pH natural se encuentra en el rango de 7.8-8.2, dependiendo de la salinidad y la concentración de la dupla ion carbonato/bicarbonato (HCO_3^-/CO_3^{2-}) siendo este ion uno de los principales responsables del efecto buffer [13], [39]. La alcalinidad del agua de mar está causada por el ion bicarbonato disuelto y el equilibrio que genera con las siguientes reacciones [13]:



Si bien son las reacciones del ión carbonato y del ión bicarbonato son las más comunes, el comportamiento variará según el pH inicial del agua, la composición del agua de mar, el pH natural de la pulpa y las principales especies presentes.

Hoy en día, el principal mecanismo para la elaboración de curvas de cal consiste en la utilización de un molino a escala de laboratorio, pero en los últimos años han salido nuevas tecnologías que permiten un mejor control de los parámetros y asemejarse más a la realidad. A continuación, se presentan los métodos con sus principales ventajas y desventajas.

2.5.1 Elaboración de curvas mediante método tradicional

El mecanismo mediante el cual se elaboran las curvas de consumo de cal actualmente consiste en la molienda utilizando un molino a escala de laboratorio y una vez realizada la molienda se le realiza una titulación con cal midiendo el pH, determinando así la concentración de cal necesaria para cada pH [13], [39]. Se presenta a continuación una imagen de un molino de bolas tradicional a escala de laboratorio [42].



Figura 10 Molino de bolas tradicional a escala de laboratorio [42]

El molino de bolas de laboratorio presentado solo cuenta con la funcionalidad de realizar la molienda, sin poder controlar los parámetros como potencial, pH y oxígeno disuelto durante el proceso [42].

El no control de parámetros representa una desventaja al momento de ser comparado con la industria, debido a que en la realidad existe un control constantes de los parámetros y no se regulan solo al final [4], generando una diferencia entre lo planteado en laboratorio y la realidad, factor que puede afectar al momento de escalar los resultados.

Otra desventaja de no poder controlar los parámetros es que no existe un entendimiento de lo que ocurre durante la molienda. Esto es debido a que en el proceso se va rompiendo la roca y generando nuevas superficies de exposición haciendo que el metal reaccione durante el proceso, reacción que modifica el pH y no es controlada. Una posible consecuencia es un mayor desgaste en los medios de molienda.

2.5.2 Elaboración de curvas mediante molino Magotteaux

El molino Magotteaux es un equipo que permite la molienda con control de parámetros de manera continua, siendo estos parámetros el oxígeno disuelto (OD), pH y voltaje en la pulpa [8]. El control lo logra generando un espacio en el molino en donde solo puede entrar la pulpa, separándola de los sólidos disueltos, de esa forma determina los valores sin dañar los equipos de medición y permitiendo que puedan ser utilizados en reiteradas ocasiones [8].

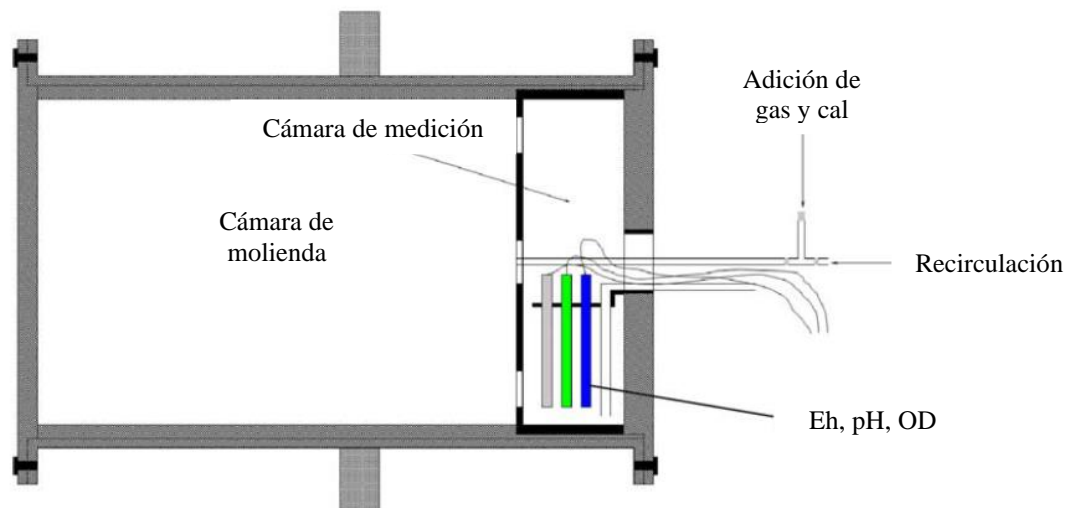


Figura 11 Operación molino Magotteaux [8]

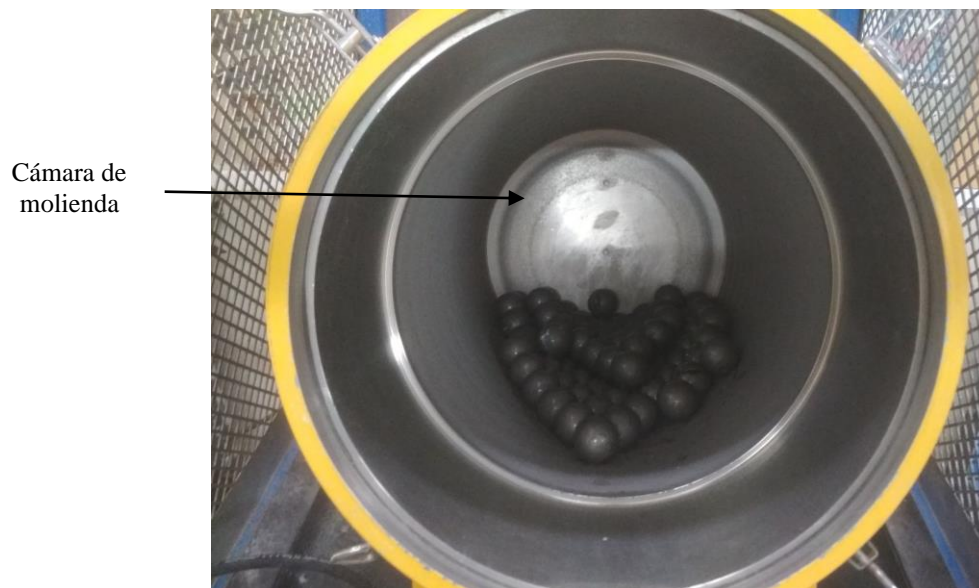


Figura 12 Interior molino Magotteaux con medios de molienda

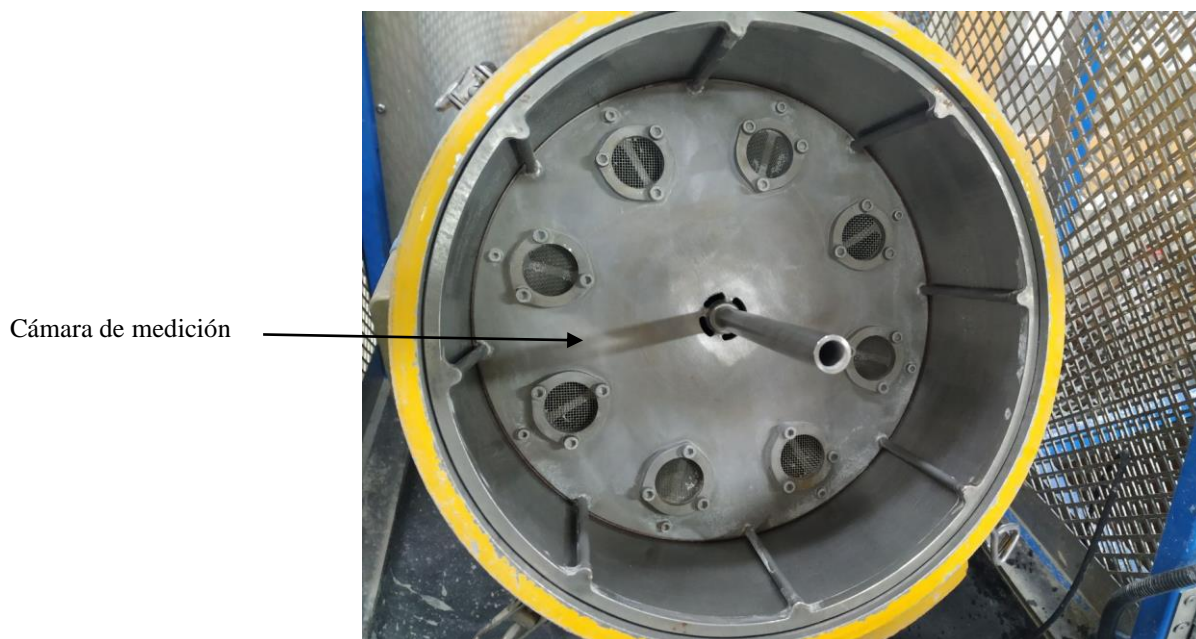


Figura 13 Separación de espacios para medición de parámetros molino Magotteaux

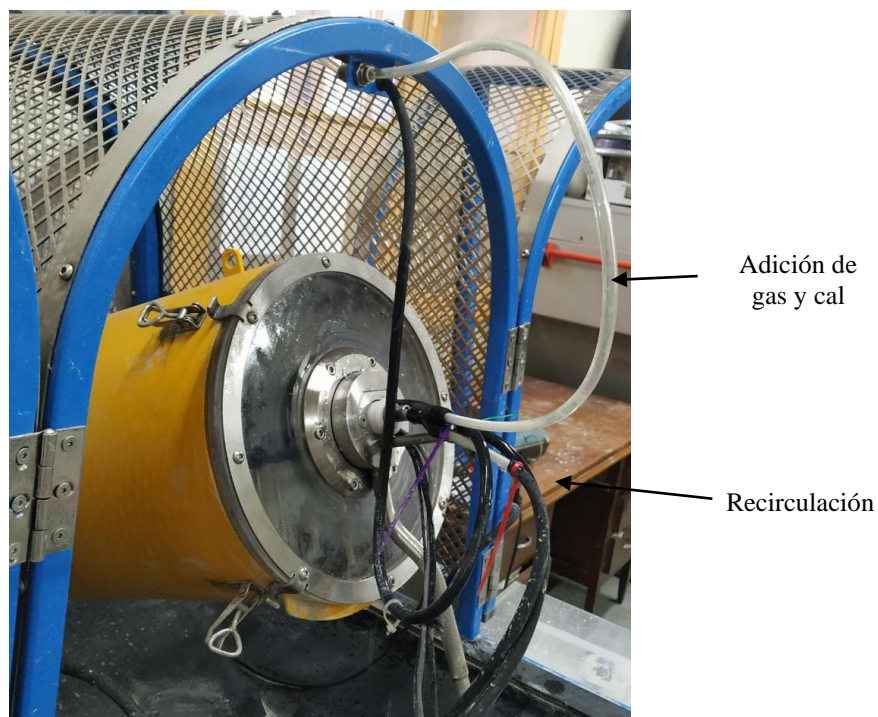


Figura 14 Vista exterior molino Magotteaux preparado para medición de parámetros y recirculación

Además de poder realizar la medición, permite agregar cal y gas con el fin de mantener constantes los parámetros que se desean [8]. De esa forma, se podría construir la curva de consumo de cal calculando cuánta cal fue necesaria para mantener con el pH deseado durante todo el proceso de molienda.

La ventaja de este mecanismo es, en primer lugar, que se asemeja a lo realizado en la industria, en donde existe un control constante del pH durante el proceso, dando resultados que pueden ser más exactos. En segundo lugar, el controlar los parámetros durante el proceso puede ayudar a un mejor entendimiento de las reacciones que ocurren en el contacto agua-roca para estudios futuros [8].

La desventaja del uso de este equipo se basa en su alto costo en comparación al método tradicional [42], [43].

2.6 Material disponible y condiciones de operación

Para el análisis del consumo de cal en molienda se posee material perteneciente de tres unidades geológicas distintas pertenecientes a un mismo yacimiento. El nombre de las unidades es M1, M2 y M3, las cuales serán mencionadas de dicha forma en el resto del informe. La cantidad de material que se posee es suficiente para la realización de los experimentos solicitados.

Durante la molienda del material se utiliza el molino Magotteaux, el cual posee condiciones de operación específicas con el fin de poder medir los parámetros constantemente y no se dañen las herramientas. Las condiciones de operación varían según el producto que se desee tener [43], las elegidas para el desarrollo experimental son.

Tabla 1 Condiciones de operación molino Magotteaux

Variable	Cantidad	Unidad de medida
Medios de molienda	15	[kg]
Agua	2	[l]
Velocidad de molienda	45	RPM
Mineral	1,5	[kg]
Composición de muestra	42,8	[%p/p]
Diámetro de entrada	<#6	Malla mesh
Flujo de aire	8	[l/s]

El molino además posee la posibilidad de operar con distintos medios de molienda, utilizando medios de acero y medios cromados al 21% en las siguientes condiciones.

Tabla 2 Medios de molienda seleccionados

Medios de molienda	Peso [kg]	Cantidad de bolas
Acero	15,015	91
Cromo 21%	15,001	128

Finalmente, se es necesario cumplir la condición de salida de la molienda que es requerido por la empresa para trabajar en la flotación. En este caso el valor del P80 para las tres unidades geológicas es de 200 [µm].

Las condiciones mencionadas serán utilizadas en todos los experimentos y se mantendrán constantes en el tiempo.

3. Metodología

Para el proceso a trabajar se es necesario preparar el material con el fin de validarlo y tener definidas las variables de trabajo, provocando que cada procedimiento sea dependiente del anterior.

En un comienzo se debe preparar el material, que consiste en chancarlo y separarlo, para luego tomar una de las muestras separadas a ser analizadas. Después, a las muestras restantes, se deben seleccionar para la realización de la cinética de molienda y con ello determinar el tiempo necesario para llegar al P80 correspondiente. Con el tiempo de molienda calculado, se puede pasar a preparar el agua del proceso, la que debe poseer los mismos iones disueltos que en la mina. Finalmente, se pasa al último experimento que son las curvas de consumo de cal considerando el escenario de control de pH durante molienda y posterior a esta. El procedimiento debe ser realizado por separado en cada Unidad Geológica.

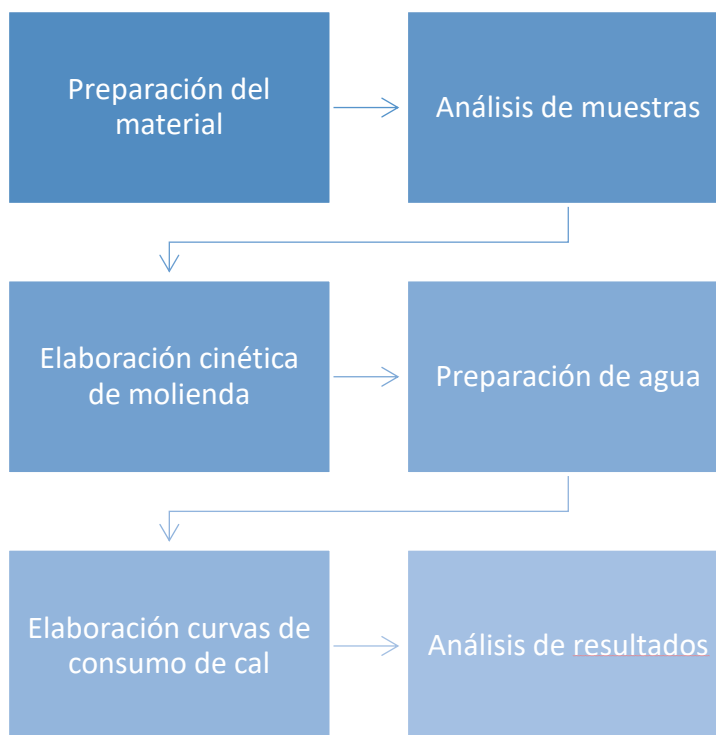


Figura 15 Diagrama resumen metodología

3.1 Preparación del material

La preparación de material consiste en asegurar que el diámetro de todas las partículas sean menor a los 3,36 [mm] (malla #6) [43]. Para ello, se debe:

1. Recepción del material y clasificación según unidad geológica de origen.
2. Chancar el mineral hasta que todo pueda pasar una malla #6.
 - a. En caso de quedar remanente, este es pulverizado por 2 segundos y se asegura que pase la malla.
3. Separación en cortador rotatorio asegurando que sea homogéneamente separado.
4. Guardar el mineral en muestras de 1,5 [kg], cumpliendo el peso recomendado [43].
5. Validar separación viendo distribución de las muestras y comparando las curvas granulométricas de cuatro muestras aleatorias.

El proceso debe ser realizado por separado con cada unidad geológica. Más detalles de la metodología se puede ver en Anexo Preparación de material.

3.2 Análisis de muestras

El análisis de muestras es con el fin de conocer la composición química de las muestras considerando que fueron repartidas homogéneamente. Los estudios por realizar son:

- Porcentaje de liberación de especies según tamaño de partícula.
- Contenido de mineral según tamaño.
- QEMScan.

3.3 Cinética de molienda

La cinética de molienda consiste en encontrar el P80 frente a distintos tiempos de molienda y con ello determinar el necesario para llegar a malla #200. Esto se logra realizando con cada unidad geológica (UG):

1. Procesar cinco muestras distintas de la UG a diferentes tiempos de molienda.
2. Deslamar el producto de las moliendas.
3. Tamizar y calcular el P80 según cada tiempo de molienda.
4. Ajustar curva de cinética de molienda.
5. Determinar tiempo de molienda.

Más detalles del proceso y criterios a utilizar en Anexo Cinética de molienda.

3.4 Preparación de agua

La preparación del agua consiste en poseer las especies disueltas similares a las del agua utilizada por la empresa, que en este caso se trata de agua de mar desalinizada. Para el proceso se utilizan las recomendaciones para trabajar con agua de mar sintética realizadas por Lyman y Fleming [44]:

1. Determinación de sales a disolver a partir de agua purificada.
2. Preparación de la mezcla separando las sales gravimétricas y las volumétricas.
3. Control de pH de la mezcla realizada.
4. Separar para utilizar en experimentos.

Las condiciones que se desean llegar son:

Tabla 3 Composición agua utilizada en empresa minera

Elemento	Unidad de medida	Concentración
Cloruro	mg/L	458
Sulfato	mg/L	2.750
Calcio	mg/L	578
Magnesio	mg/L	75
Potasio	mg/L	48
Sodio	mg/L	784
pH	s.u.	8,0
STD	mg/L	4.699

Para ello, se necesita determinar la concentración de cada sal, calculándose y remarcándose lo necesario para 2 litros, que es volumen utilizado en los experimentos:

Tabla 4 Concentración sales requeridas preparación de solución

Compuesto	Concentración [mg/L]	Para 2L [mg]
NaCl	0,0	0,0
KCl	93,5	186,9
MgCl₂	616,2	1232,4
CaCl₂	418,4	836,8
Na₂SO₄	2423,0	4846,0
K₂SO₄	0,0	0,0
MgSO₄	0,0	0,0
CaSO₄	1992,6	3985,2

Más detalles del proceso se pueden obtener en Anexo Preparación de agua.

3.5 Elaboración de curvas de consumo de cal

En la elaboración de curvas de consumo de cal se debe separar en dos métodos distintos. Por un lado, están las curvas mediante el método tradicional y, por otro lado, las curvas controlando parámetros, que se logrará usando las capacidades del molino Magotteaux.

3.5.1 Elaboración de curvas método tradicional

El método tradicional consiste en agregar la cal posterior a la molienda, significando la siguiente metodología:

1. Moler una muestra durante el tiempo determinado para llegar al P80 de operación.
2. Llevar producto a agitador.
3. Agregar cal disuelta en agua purificada a concentración 20 [g/l].
4. Registrar cal agregada para llegar al pH deseado.

3.5.2 Elaboración de curvas mediante molino Magotteaux

Se controla el consumo de cal durante la molienda con la siguiente metodología adaptada a las propiedades del equipo:

1. Preparar solución de cal disuelta en agua purificada a concentración 20 [g/l].
2. Determinar pH a trabajar, pudiendo ser 9,5; 10; 10,5 o 11.
3. Moler muestra durante el tiempo determinado para llegar al P80 de operación controlando:
 - a. pH constante durante la molienda agregando cal.
 - b. Cantidad de cal agregada durante el tiempo.
4. Registrar consumo total de cal para mantener el pH electo.
5. Repetir experimento manteniendo otros cuatro valores de pH diferente.
6. registrar cal agregada para operar al pH deseado en cada experimento.

En ambos casos, el consumo de cal se presenta en gramos de cal agregados según kilogramos o toneladas de mineral procesado, mostrándose en el presente informe como “[g/kg]”.

Los experimentos se realizarán utilizando como medio de molienda bolas de acero y bolas de acero con aleación de 21% de cromo. En el caso de los experimentos realizados con bolas de acero, las curvas mediante molino Magotteaux tendrán duplicado, referenciándose a ellos como Versión 1 (V1) y Versión 2 (V2).

Debido a que las unidades geológicas poseen diferente composición química, es necesario elaborar curvas para cada UG. Más detalles de la metodología se pueden revisar en Anexo Elaboración de curvas de consumo de cal.

Finalmente, existirá registro constante de los valores que alcanzan el pH, el voltaje y el oxígeno disuelto registrados en el equipo.

4. Resultados

4.1 Análisis de muestras

4.1.1 Composición de muestra

Luego del análisis químico se llegan a que según cada unidad geológica existen similares especies liberadas. En la siguiente tabla se muestran normalizados las principales especies presentes.

Tabla 5 Distribución modal por muestra

Minerales	M1	M2	M3
Calcopirita	1,098	1,52	0,698
Bornita	0,008	0,00	0,001
Calcocita/Digenita	0,007	0,00	0,001
Covelita	0,000	0,00	0,000
Enargita/Tenantita	0,000	0,00	0,000
Molibdenita	0,035	0,02	0,024
Pirita	0,268	0,02	0,064
Hierro Óxidos/Hidróxidos	0,560	0,38	0,729
Albita feldespato	22,138	26,53	29,200
Feldespato de plagioclasa	10,987	7,97	9,625
K-feldespato	21,163	16,47	19,086
Cuarzo	26,470	36,10	26,063
Calcita	1,634	1,61	0,841
Sulfatos	0,059	0,03	0,077
Sericita/Moscovita	4,389	4,67	3,981
Biotita/Flogopita	0,607	0,15	0,215
Clorita	3,361	1,03	3,050
Epidota	1,216	0,22	0,452
Turmalina	0,029	0,01	0,018
Arcillas	4,219	1,99	4,455
Arcilla: Caolinita 1A	2,227	1,131	2,577
Arcilla: Illita	0,791	0,340	0,000
Arcilla: Montmorillonita	1,201	0,517	1,879
Anfíbol (Horblenda)	0,122	0,02	0,033
Tremolita/Actinolita	0,317	0,07	0,053
Pirofilita	0,001	0,00	0,001
Otros silicatos	0,266	0,32	0,271
Apatito	0,316	0,31	0,293
Ti minerales	0,675	0,51	0,686
Esfeno	0,047	0,03	0,133
Circón	0,043	0,00	0,018
Otros	0,003	0,01	0,002
Total	100,06	100,00	100,08

Se resalta que la distribución de los compuestos presentes es similar para las tres unidades geológicas, en donde el principal agente son los silicatos duros, estando presentes feldespatos y cuarzo en ello (Anexo Análisis de muestras). En general, la presencia de silicatos, arcillas y filosilicatos es mayor en M3, luego en M1 y finalmente en M2.

4.1.2 Principales fenómenos esperados

A partir de la información entregada por la Tabla 5 los principales minerales presentes son:

Tabla 6 Principales elementos presentes

Principales compuestos presentes
Cuarzo
Feldespatos (a base de potasio, plagioclasa, albita)
Arcillas: Caolinita, illita y anfíbol
Calcopirita
Pirita
Otros silicatos y filosilicatos

Tomando en cuenta lo mencionado, se resaltan las principales reacciones esperadas considerando que se desea entender de mejor manera el consumo de cal durante la molienda debido a la variación del pH.

4.1.2.1 Calcopirita y pirita

Comenzando con la calcopirita, esta se trata de una de las principales formas en que se encuentra el cobre en Chile [45]. Su fórmula química es CuFeS_2 [46] y se puede reducir u oxidar según las condiciones de Eh y pH [47].

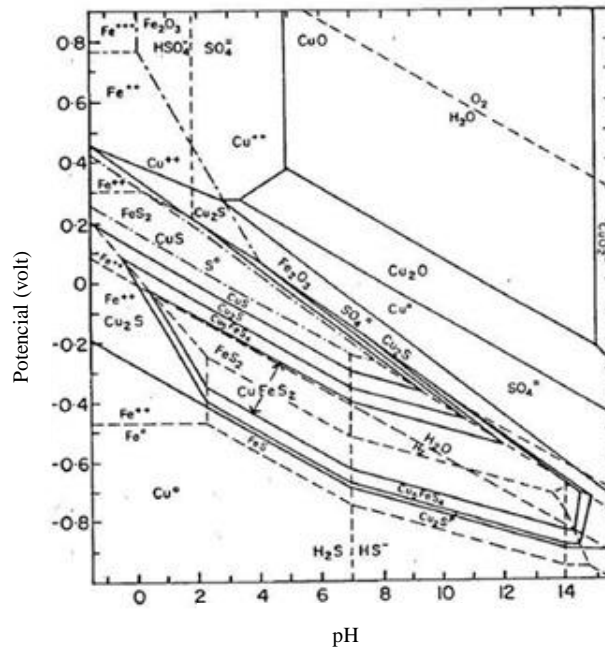


Figura 16 Diagrama Eh vs pH Cu-Fe-S [47]

Tomando en cuenta que, según metodología, el pH de los experimentos estará entre 8 (agua de mar desalinizada) y 11 (punto máximo curva consumo de cal). En ello, se podrá encontrar presencia de Cu_2O y Cu^+ con SO_4^+ , llegando también a existir la posibilidad de encontrar hematita y pirita dentro de los compuestos presentes.

La pirita, también presente en el proceso de molienda, se trata de un compuesto que posee hierro y sulfuro (FeS_2) [48]. Al igual que otros compuestos de la molienda, ocurren reacciones REDOX dependiendo las condiciones en que se encuentre [49].

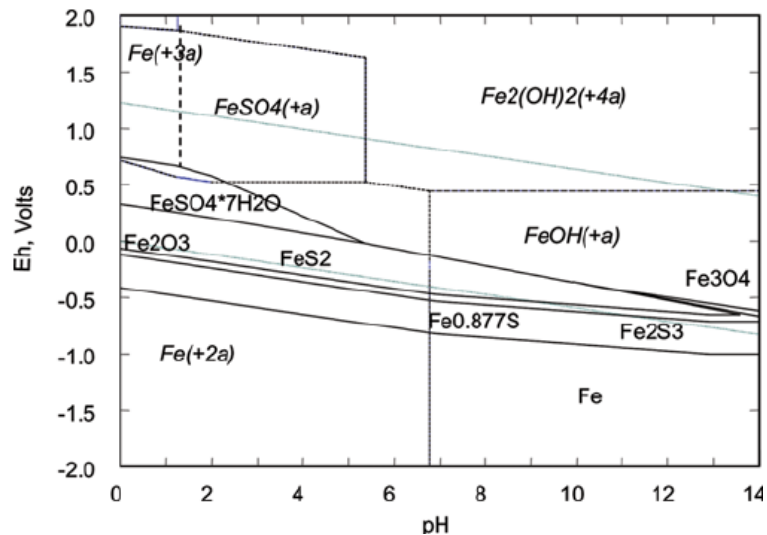


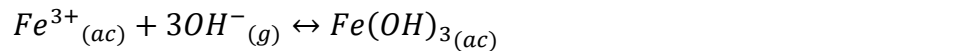
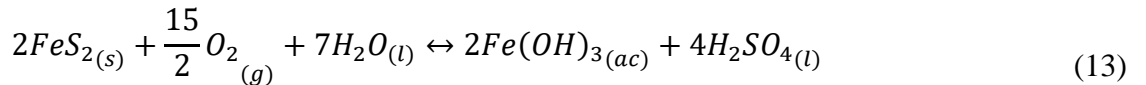
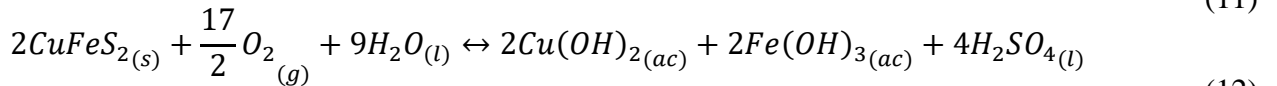
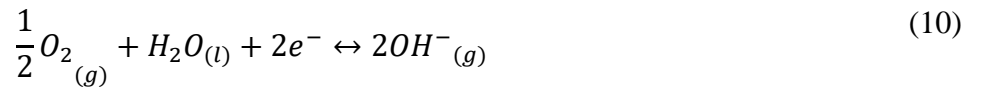
Figura 17 Diagrama Eh-pH de Fe - S [49]

Considerando las condiciones en que se trabaja, se espera presencia de pirita y de hidróxido de Hierro (FeOH^+), el cual va a ser mayor a medida que crezca el pH.

Las tablas mostradas son elaboradas con el fin de conocer el comportamiento, pero no necesariamente consideran las reacciones que pueden ocurrir con otros compuestos [34]. Dentro de las reacciones estudiadas en la minería y en la molienda es la relación entre pirita y calcopirita que más resaltan debido a que una es un factor constante en la disminución de eficiencia del proceso y la segunda es el mineral en el cual normalmente se encuentra el cobre [35], [50], [51].

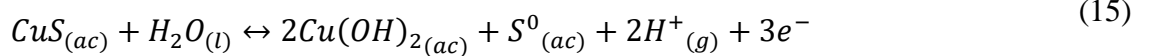
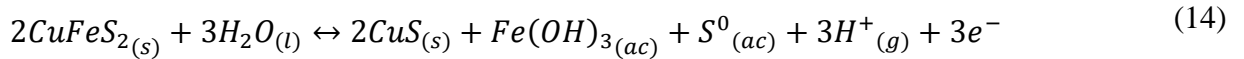
Considerando que dentro del molino existen múltiples especies presentes, las reacciones de oxidación y reducción se presentan solamente en una dirección debido a que la especie que puede estar recibiendo los electrones se puede tratar de uno de los tantos compuestos que tiene el mineral y se haya activado [50].

Una de las reacciones que afectan el valor del pH en la solución se trata cuando se le inyecta oxígeno, en donde se genera ácido a partir de la oxidación. El sistema de ecuaciones que representan el fenómeno son [50]:



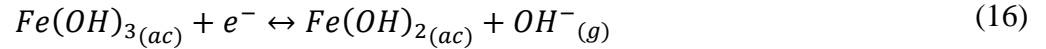
De forma natural, la presencia de oxígeno significa una acidificación de la solución y, al ser bombeado constantemente, ocurriría de manera permanente. Sin embargo, el operar a pH más altos, existe una mayor posibilidad de presencia de hidróxido férrico tomando en cuenta la Figura 17, provocando que el equilibrio en todas las ecuaciones anteriormente planteadas vaya a la generación de menos ácido sulfúrico.

Además, al estar la pirita en contacto con la calcopirita forman entre ellos un par galvánico, provocando la siguiente reacción superficial en la calcopirita [51]:



Las ecuaciones planteadas también significan una disminución en el valor del pH en el tiempo, disminución que no sería acelerada en el caso del control de pH debido a la presencia del hidróxido férrico.

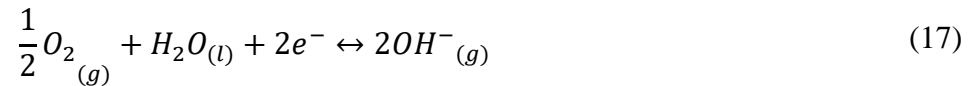
Finalmente, en medio alcalino puede ocurrir una disociación del hidróxido férrico [52]:



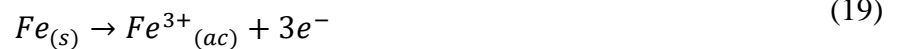
Generando que a pH alcalino la reacción se desplace a la formación de hidróxido ferroso, disminuyendo el pH [52].

4.1.2.2 Efecto galvánico con medios de molienda

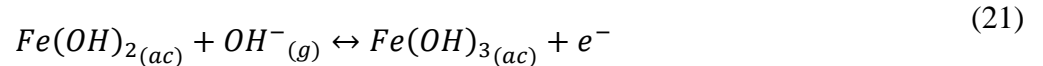
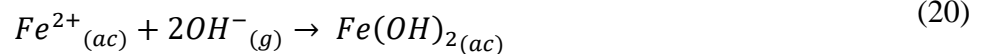
Como ya fue mencionado, el efecto galvánico puede ser provocado por la presencia de un mineral con presencia de sulfuro o con dos, cumpliendo la pirita el rol de cátodo [35]. Para ambos casos, la reacción catódica en la superficie de mineral es [35]:



Las reacción anódica en la superficie de medios de molienda consiste en [35]:



Considerando la precipitación férrica [35]:



El efecto galvánico con un solo mineral sulfurado se muestra en la Figura 18 [53].

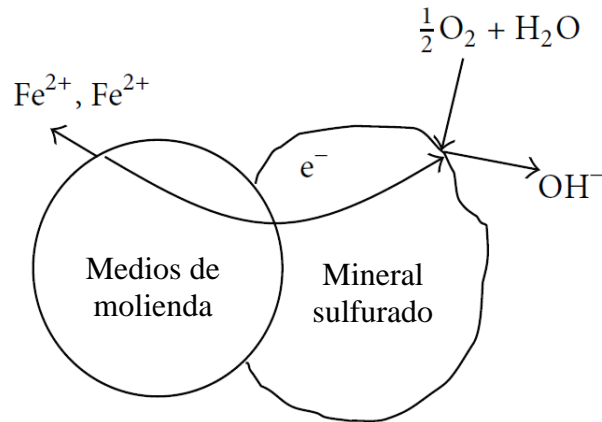


Figura 18 Efecto galvánico en la presencia de un mineral sulfurado [53]

En el caso de dos medios sulfurados, la pirita cumple el rol de mineral catódico, generando que el segundo mineral reaccione formando [35]:



La reacción mencionada se muestra en la Figura 19 [54]:

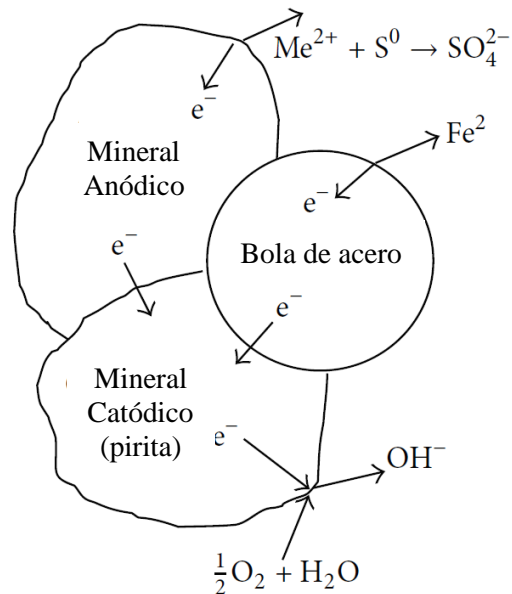
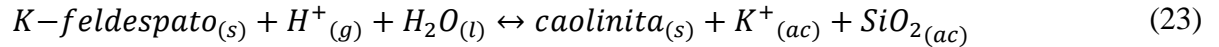


Figura 19 Efecto galvánico en la presencia de dos minerales sulfurados [54]

El efecto galvánico posee una menor preponderancia en ambientes alcalinos, provocando una disminución en la corrosión de los medios de molienda y menos hierro presente, el cual afecta negativamente a la flotación futura [35].

4.1.2.3 Feldespatos y caolinita

Los k-feldespatos reaccionan generando caolinita principalmente en ambientes ácidos de la siguiente forma [55]:

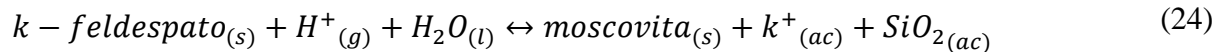


Con el siguiente valor de constante de equilibrio [55]:

$$K_{eq} = 10^{-1,8}$$

Eso significa que requiere una alta presencia de feldespato y una baja de caolinita para mantener el equilibrio, factor que se cumple en las unidades geológicas trabajadas. Sin embargo, al trabajar en un medio alcalino puede tender a la formación de feldespatos y, por consiguiente, que la reacción acidifique el medio.

Los k-feldespatos también reaccionan generando moscovita siguiendo una estructura similar [55]:



Con la siguiente constante de equilibrio:

$$K_{eq} = 10^{-8,2}$$

Considerando las constantes de equilibrio, los feldespatos mantendrán un equilibrio con la moscovita y caolinita presente, afectando el pH, pero no de manera considerable.

4.1.2.4 Cuarzo, epidota y comportamiento de pH esperado

El cuarzo y la epidota reaccionan según el pH del ambiente, pero estas reacciones comienzan a ocurrir de manera significativa una vez se superan los cien grados Celsius [56]. Esto provoca que no afecte en las condiciones de operación planteados, asumiendo que no reaccionan.

A partir de las reacciones planteadas con respecto a los principales elementos presentes, se espera que el pH durante la molienda descienda constantemente debido a la generación constante de ácido sulfúrico (H_2SO_4), junto a una deposición del hidróxido férrico ($Fe(OH)_3$) que se mantiene permanente en el tiempo.

Se espera que exista una diferencia en el consumo de cal al variar entre analizar el consumo durante la molienda o al final de esta. Esto es debido a que las reacciones, al actuar con un pH más alto, tenderán a un equilibrio en donde el efecto galvánico sobre los medios de aceros será menor

y al mismo tiempo se generará una disminución en la cantidad de ácido sulfúrico. Provocando que cuando se libere la especie, esta no realice su reacción, haciendo que la pirita genere el ion férrico por su estado de Eh-pH y la calcopirita no alcance a reaccionar.

4.2 Preparación de material y cinética de molienda

De la preparación de material se obtienen las bolsas con material. El detalle de cada bolsa se desarrolla en el Anexo Preparación de material y se presenta en la siguiente tabla resumen:

Tabla 7 Resumen elaboración muestras experimentos

	M1	M2	M3
Promedio [g]	1503,8	1492,1	1494,6
Mediana [g]	1500,9	1494,0	1493,9
Desv Est [g]	18,2	20,0	12,8
Min [g]	1459,1	1457,0	1473,7
Max [g]	1558,4	1557,0	1530,1
% error max	3,9%	3,8%	2,0%

Luego de revisar y aprobar la composición granulométrica (Anexo Preparación de material), se procede a la elaboración de la cinética de molienda, la cual arrojó las siguientes curvas con su ajuste potencial correspondiente.

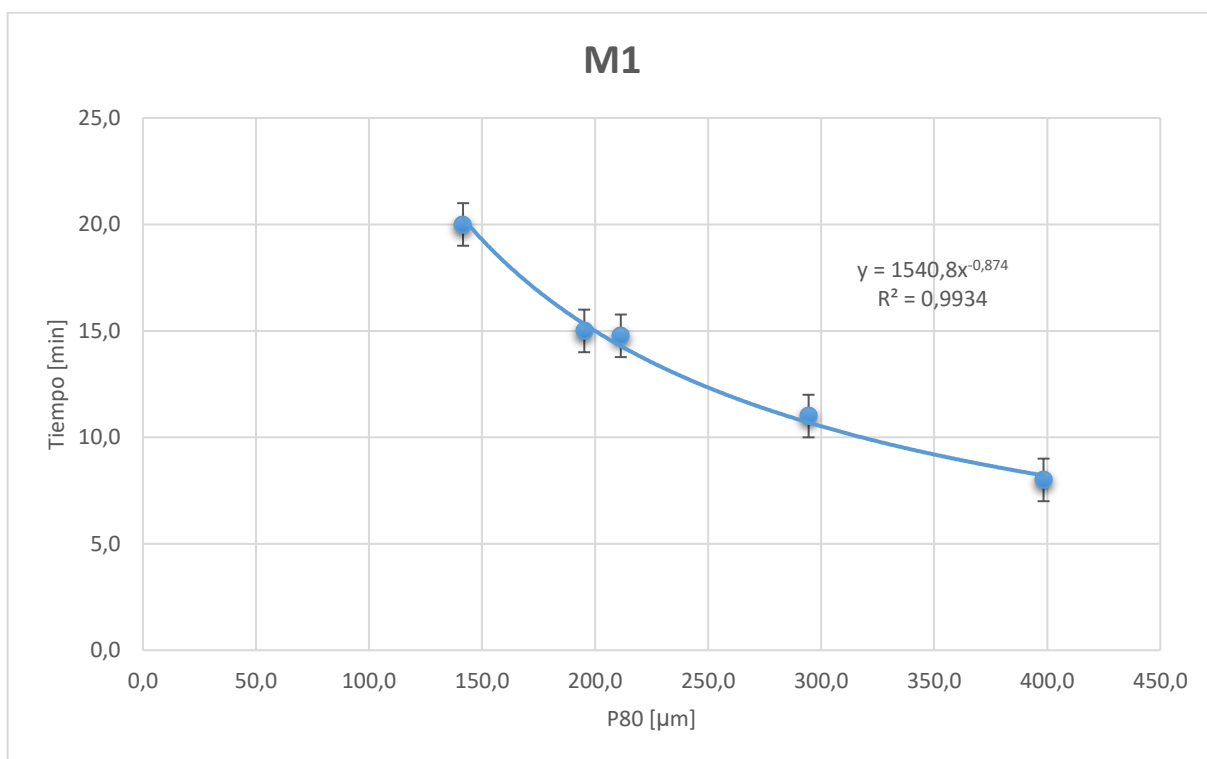


Figura 20 Cinética de molienda M1

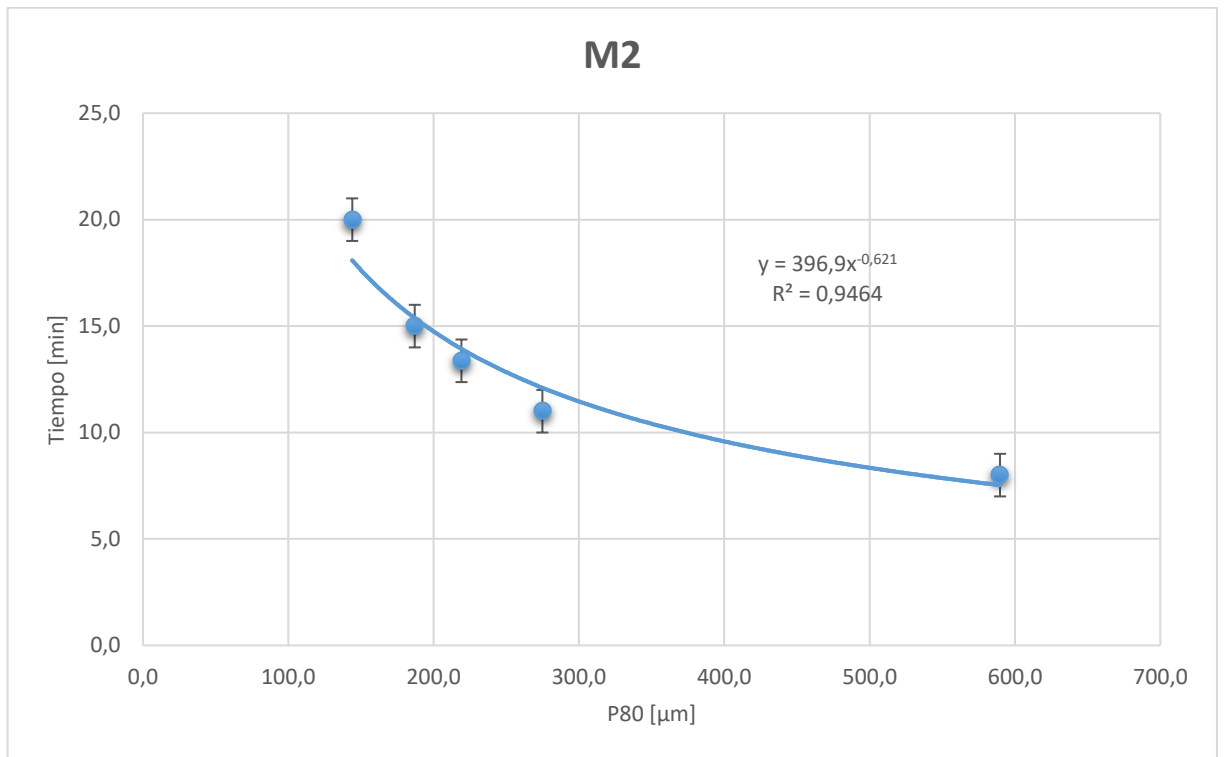


Figura 21 Cinética de molienda M2

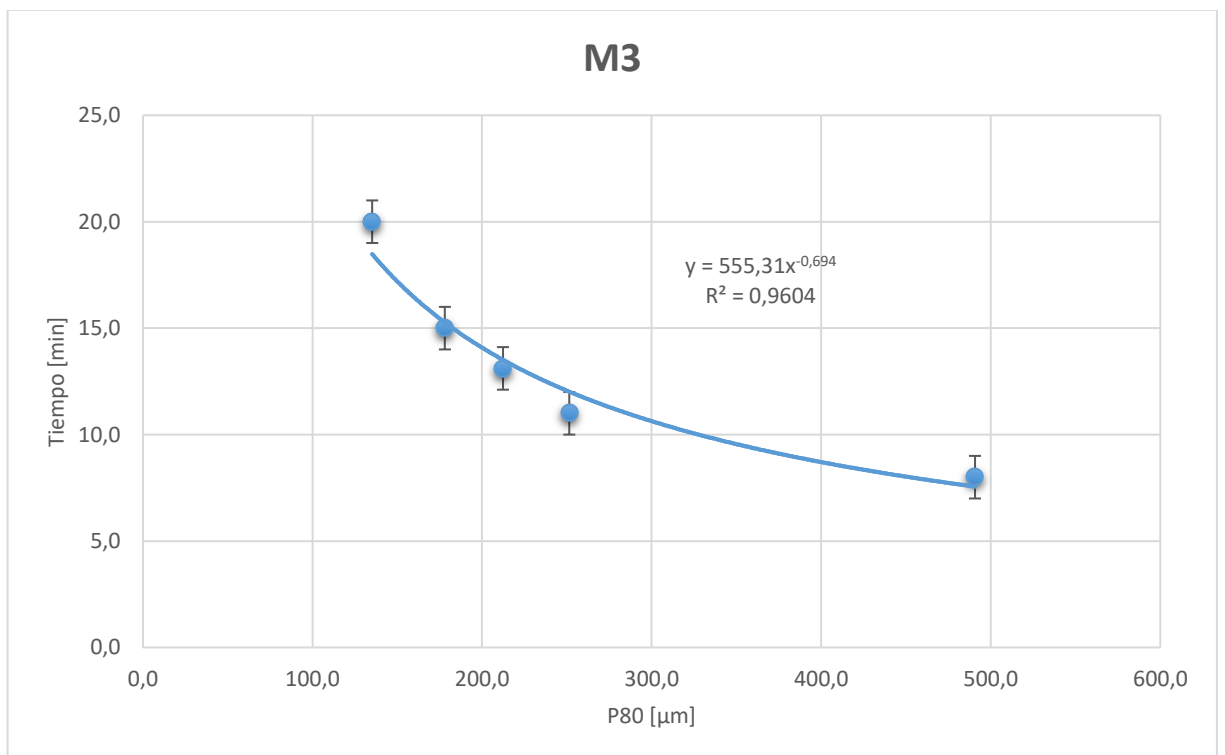


Figura 22 Cinética de molienda M3

De las curvas y del ajuste potencial realizado se determinan los tiempos de operación para que el P80 sea lo más cercano a malla #200. Estos son aproximados debido a la variabilidad natural que posee el proceso:

Tabla 8 Tiempos de molienda finales malla #200

Unidad geológica	Tiempo de molienda [min:seg]
M1	15:00
M2	14:50
M3	14:00

Más detalles de la determinación de los tiempos de molienda se pueden encontrar en Anexo Cinética de molienda.

4.3 Curvas de consumo de cal

Durante la elaboración de las curvas de consumo de cal se obtuvieron dos resultados. En primer lugar, el consumo de cal a través del tiempo para mantener el pH constante y, en segundo lugar, las curvas de consumo de cal.

Para las curvas de consumo de cal realizadas con medios de molienda de acero se realiza un duplicado, por lo que existirá dos versiones de la curva denominadas “V1” y “V2”.

Sin importar si se agrega la cal durante o posterior a la molienda, el proceso fue realizado con el molino Magotteaux.

4.3.1 Consumo de cal a través del tiempo

En los experimentos en que era necesario mantener el pH constante durante la molienda, se mide también a qué tasa se consume la cal en el tiempo. Se observa en todos los casos, sin importar los medios de molienda utilizados, que el comportamiento es similar. Esto consiste en un consumo de cal mayor al comienzo y luego se estabiliza. Debido a que el comportamiento es similar en todos los casos, se presenta una la curva obtenida para mantener a pH 11 M3 en su segunda versión:

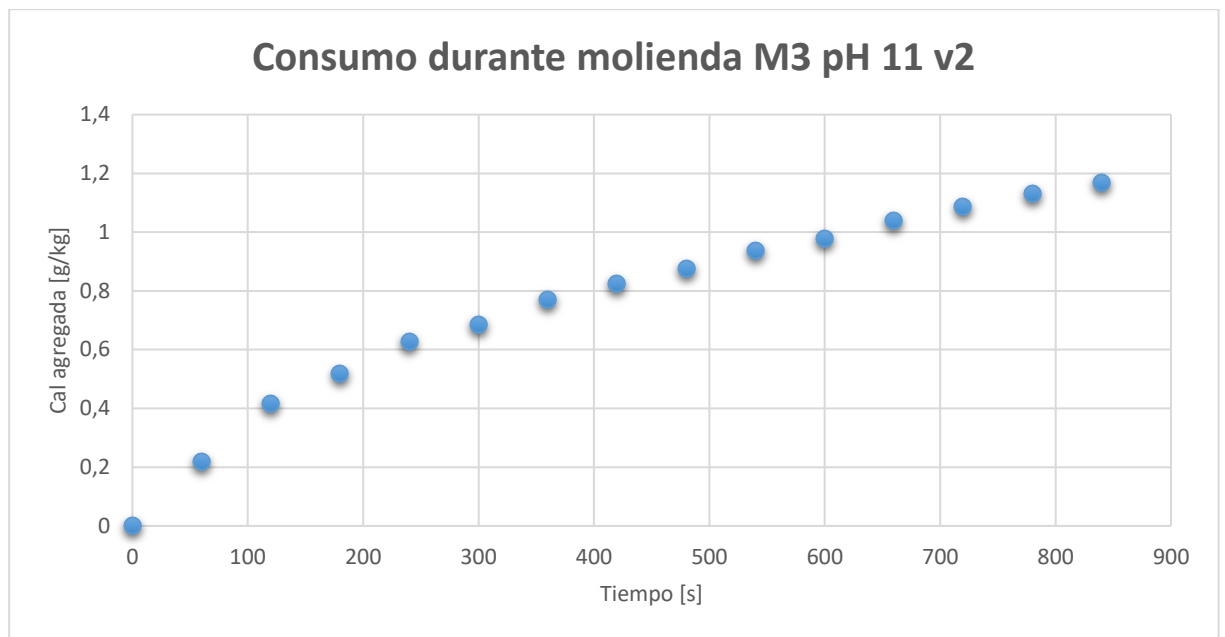


Figura 23 Consumo de cal en el tiempo durante molienda medios de acero M3 pH v2

4.3.2 Curvas de consumo de cal

Se construyen las curvas de consumo de mediante el método tradicional y controlando parámetros. Si bien ambas son realizadas con el molino Magotteaux, se denomina “Curva magotteaux” a cuando se controla el pH durante la molienda. A continuación, se presentan los resultados de los casos en que se utilizan medios de acero y los que usan medios cromados al 21%:

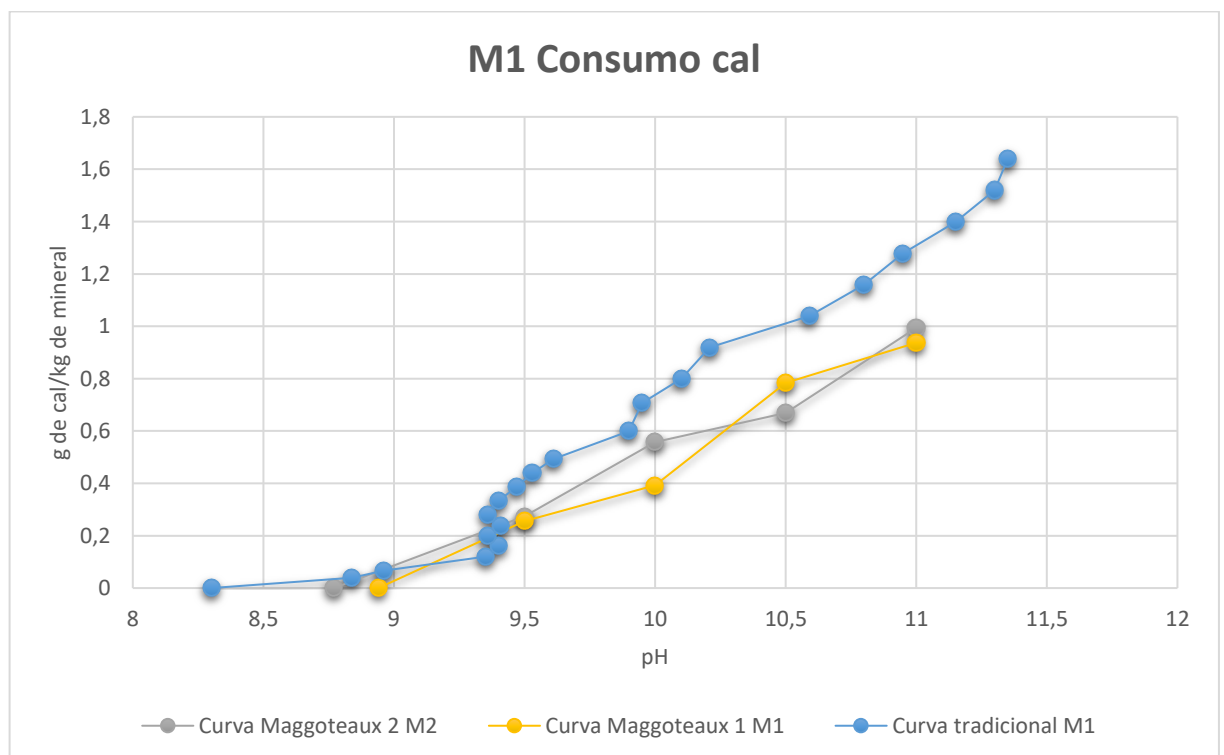


Figura 24 Curvas consumo de cal M1 medios de acero

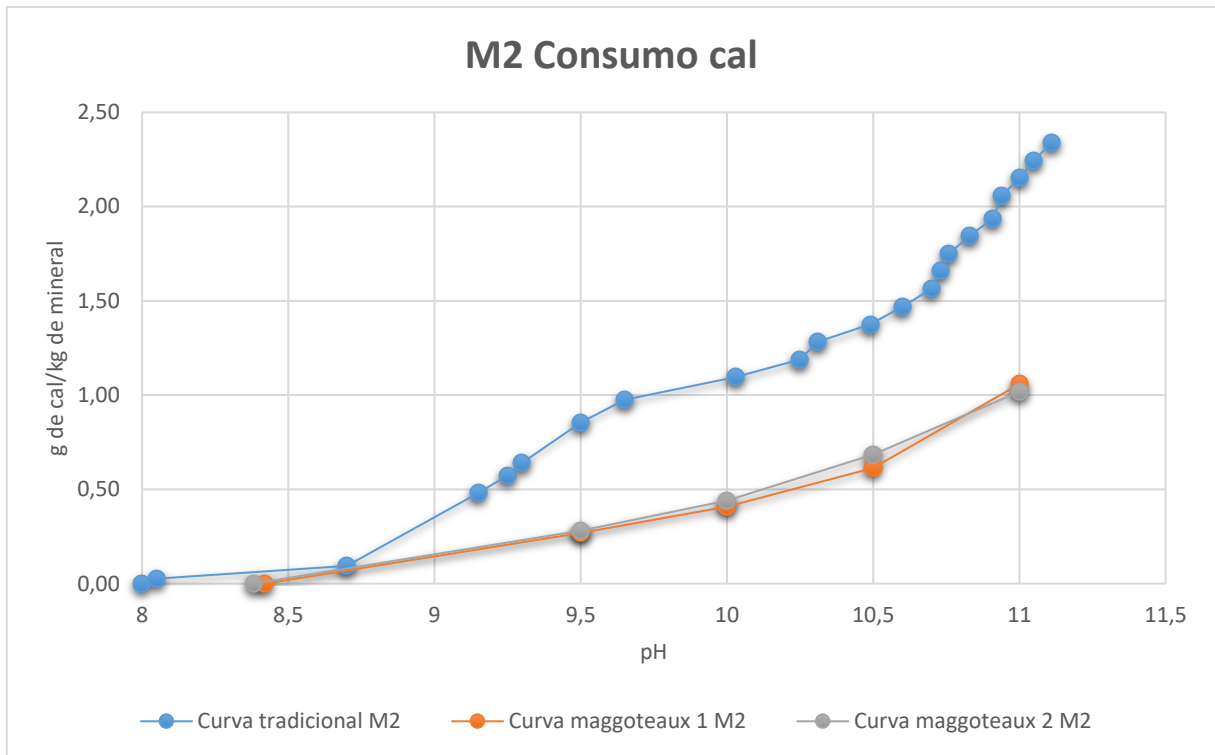


Figura 25 Curvas consumo de cal M2 medios de acero

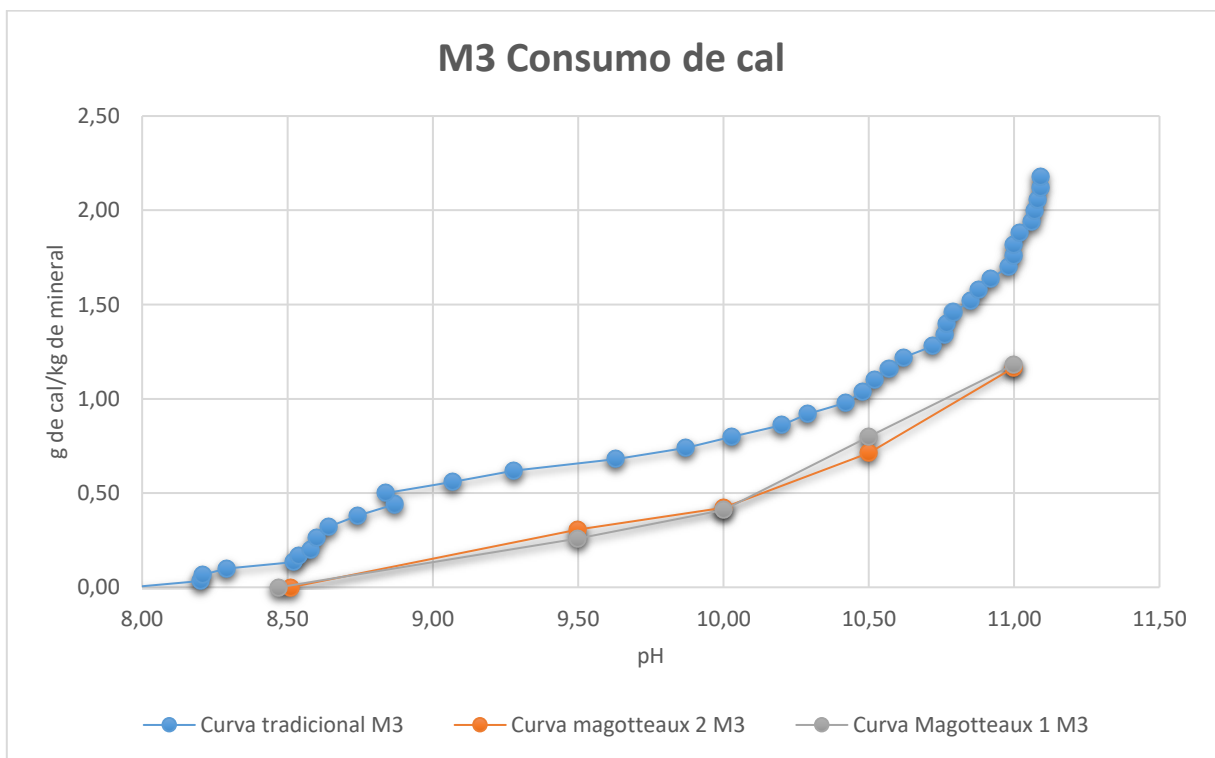


Figura 26 Curvas de consumo de cal M3 medios de acero

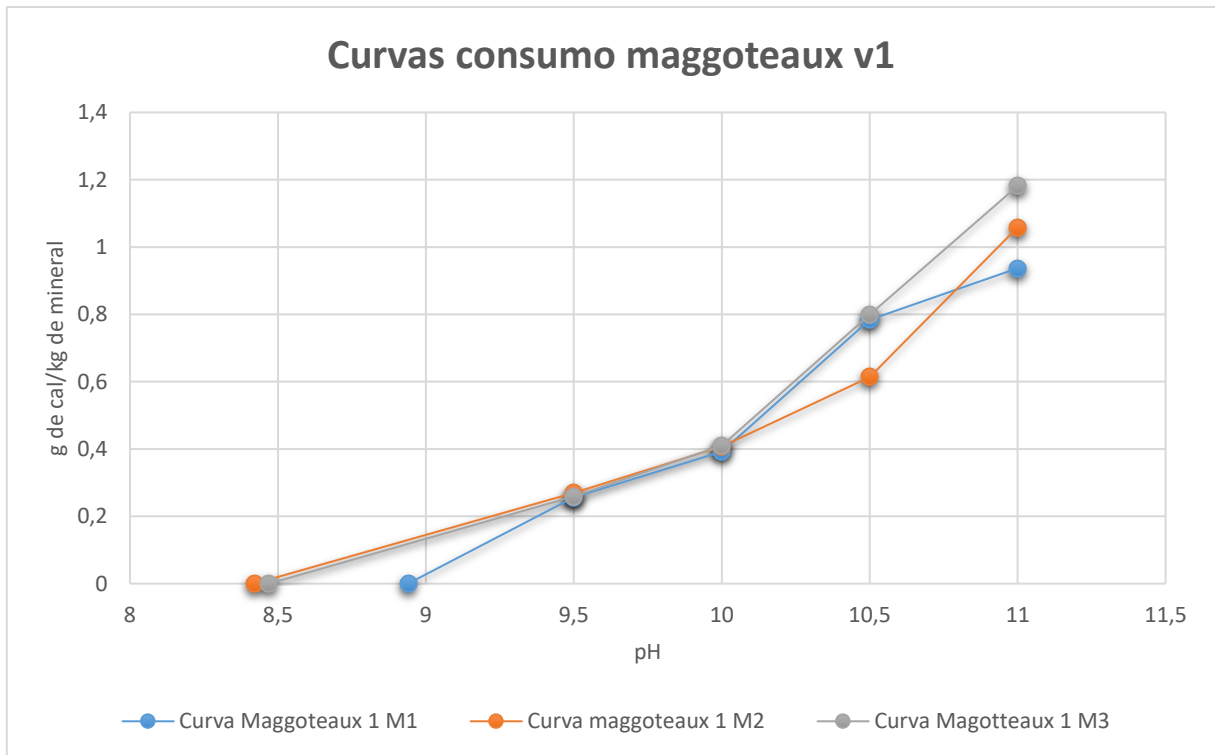


Figura 27 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios de acero v1

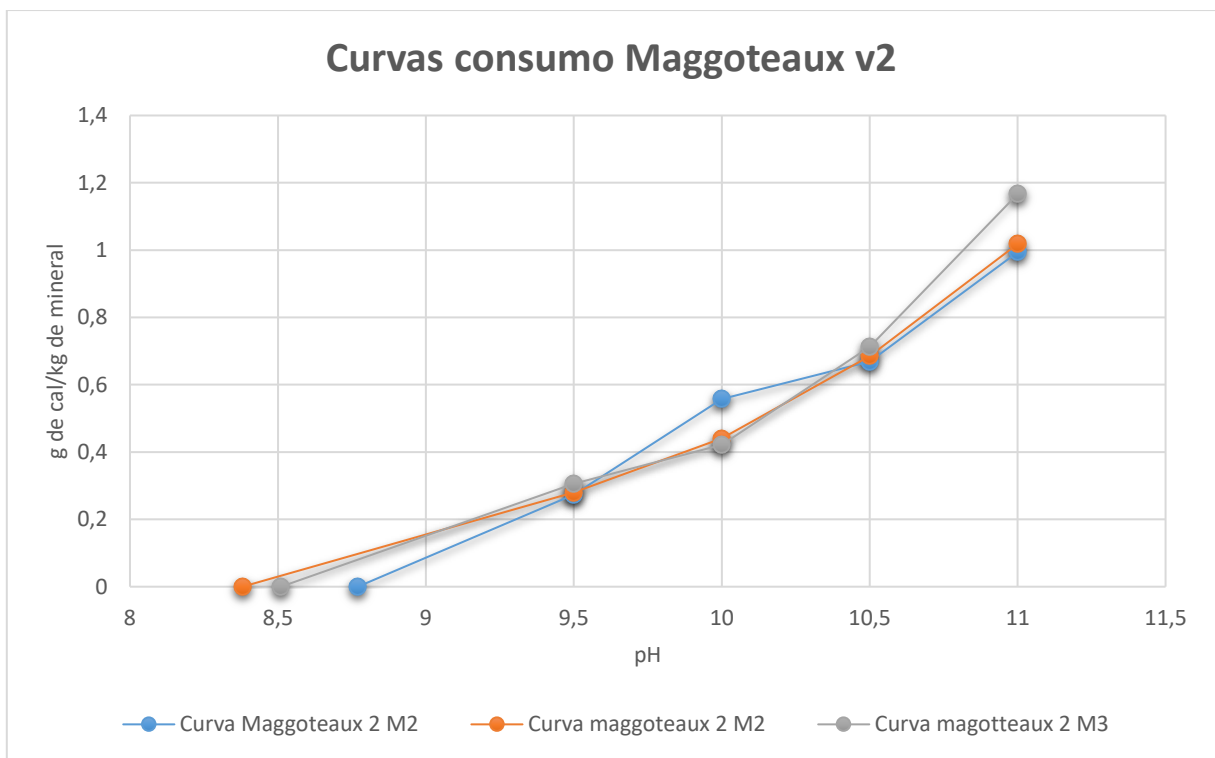


Figura 28 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios de acero v2

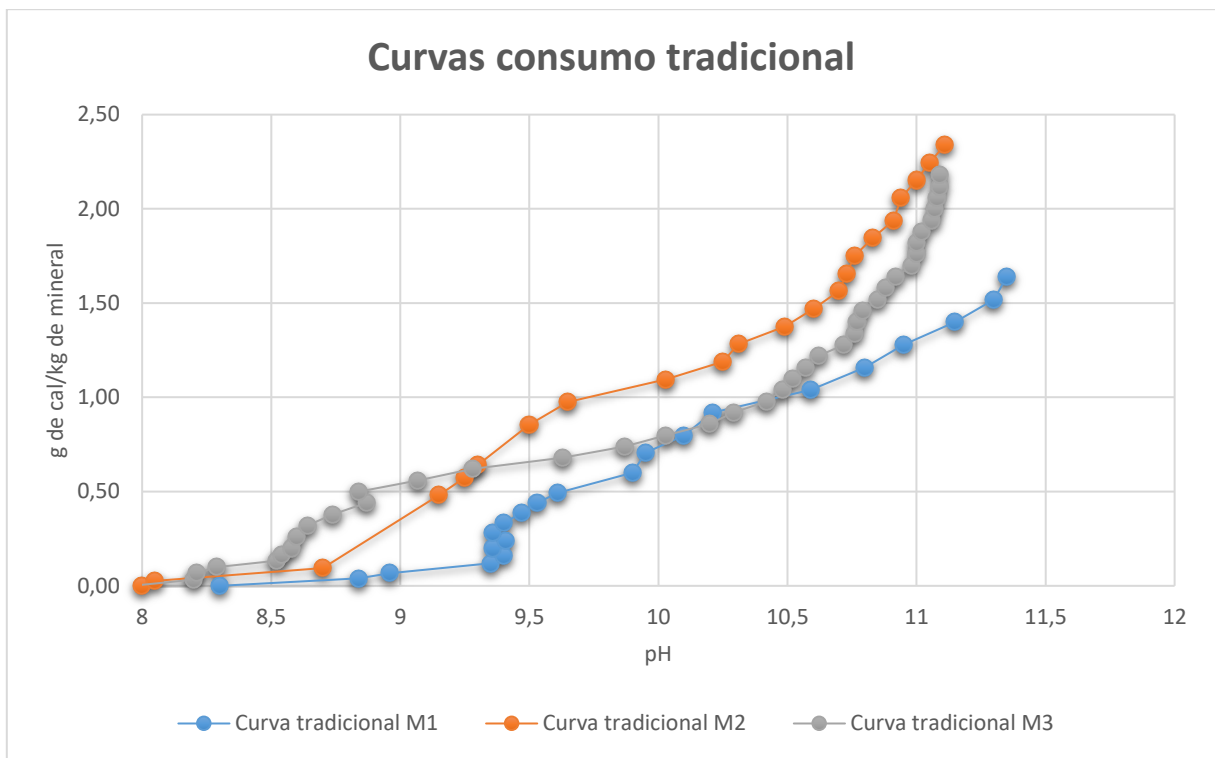


Figura 29 Comparación curvas de consumo de cal método tradicional

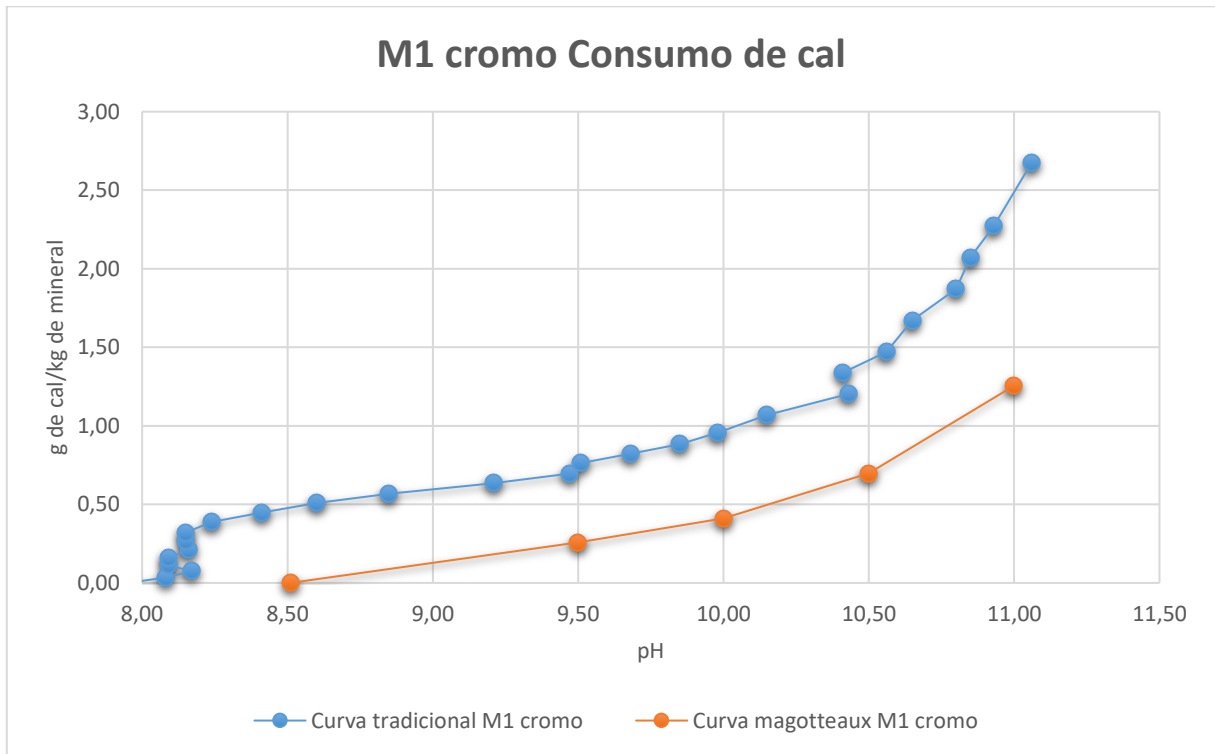


Figura 30 Curvas de consumo de cal M1 medios cromados

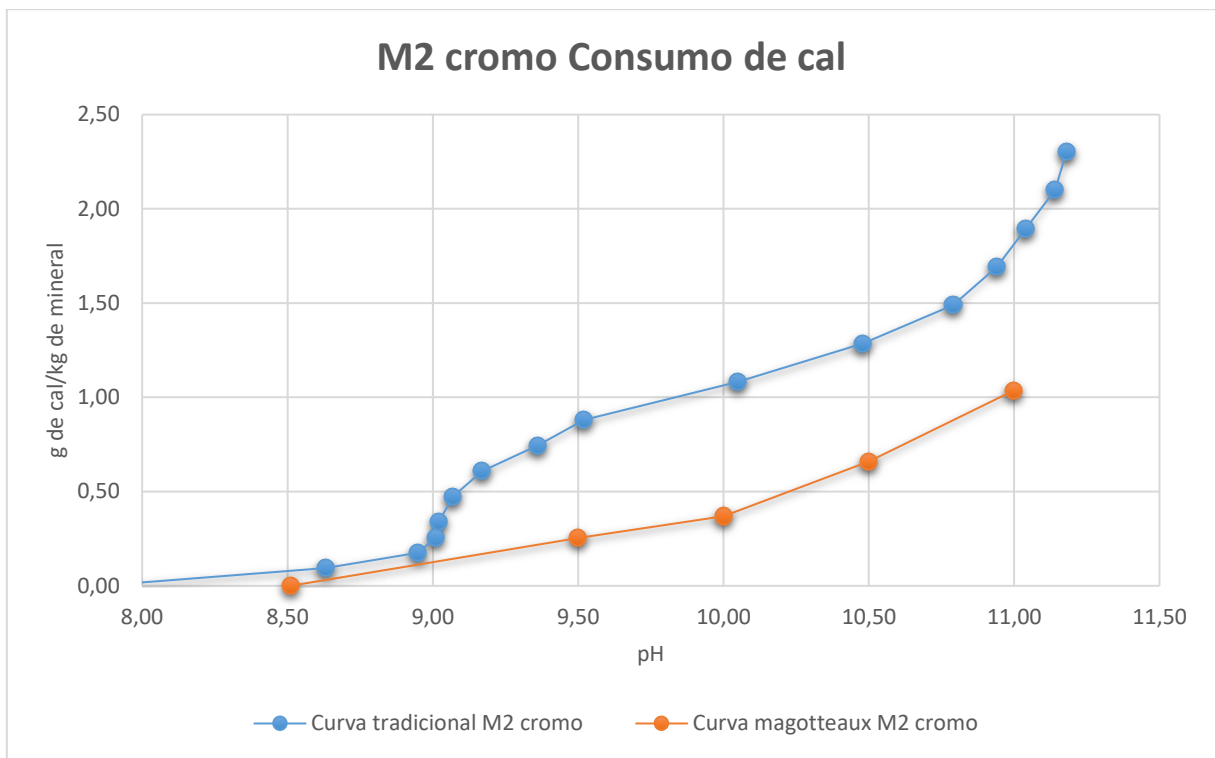


Figura 31 Curvas de consumo de cal M2 medios cromados

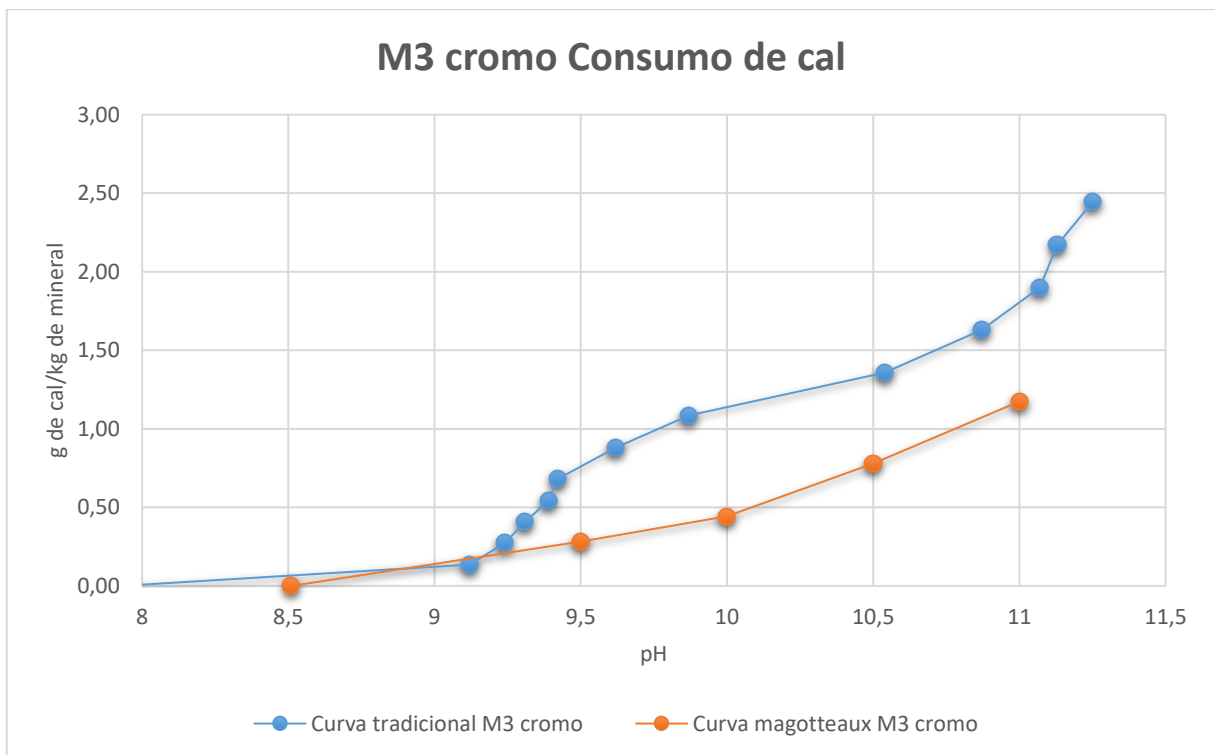


Figura 32 Curvas de consumo de cal M3 medios cromados

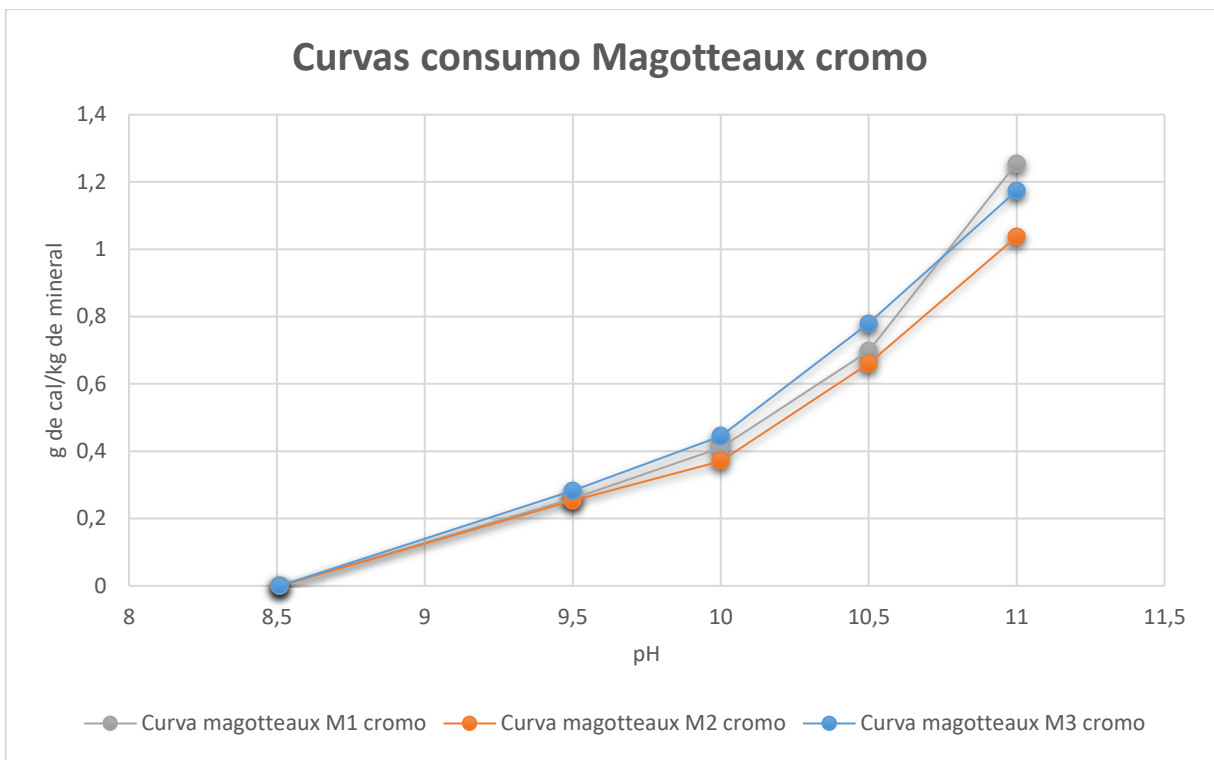


Figura 33 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios cromados

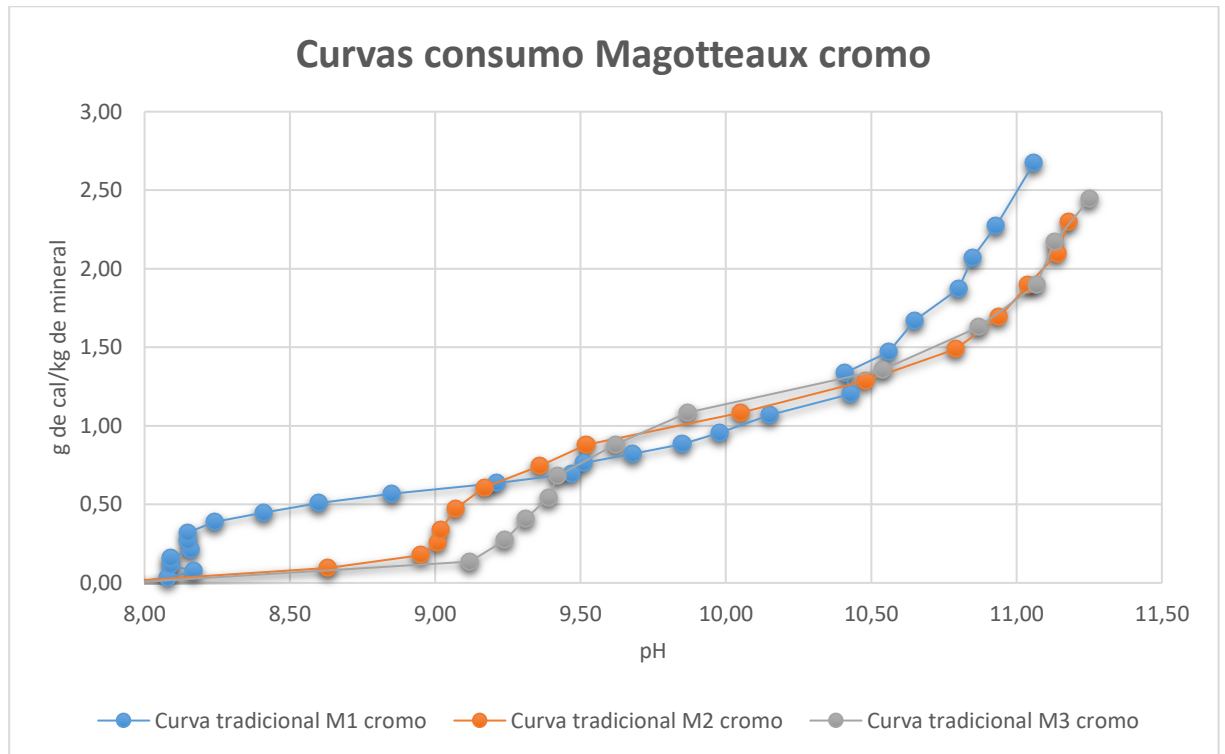


Figura 34 Comparación curvas de consumo de cal método tradicional

Se presenta el resumen de los resultados en la siguiente tabla, en donde muestra el consumo de cal en cada caso para pH 11 y su diferencia porcentual:

Tabla 9 Resumen consumo de cal medios de acero

Medios de acero	Consumo con control de pH [g cal/kg mineral]	Consumo método Tradicional [g cal/kg mineral]	% Diferencia
M1	0,93	1,40	33%
M2	1,02	2,15	52%
M3	1,17	1,82	35%

Tabla 10 Resumen consumo de cal medios cromados

Medios cromados	Consumo con control de pH [g cal/kg mineral]	Consumo método Tradicional [g cal/kg mineral]	% Diferencia
M1	1,26	1,34	6%
M2	1,04	1,90	45%
M3	1,17	1,80	35%

Finalmente, se presenta el pH medido en la pulpa, es decir, el pH sin agregar cal:

Tabla 11 pH de pulpa post molienda

	pH pulpa medios de acero	pH pulpa medios cromados
M1	8,35	7,95
M2	8,10	7,85
M3	7,96	7,93

Debido a la diferencia de cantidad de medios de molienda mostrada en Tabla 2 se estima que los resultados obtenidos con medios de acero no son comparables con los medios cromados, debido a que el diámetro de molienda final no necesariamente será el mismo. Sin embargo, si permite comprender el comportamiento en ambos escenarios

Más detalles de valores y procedimiento en Anexo Elaboración de curvas de consumo de cal.

4.3.3 Comportamiento pH y voltaje en el tiempo

Se mide el pH, voltaje y oxígeno disuelto. Se descarta la medición de oxígeno disuelto debido que solamente se registra ruido (Anexo Elaboración de curvas de consumo de cal). El comportamiento del pH y voltaje es similar en todos los escenarios, donde se observa el pH subir hasta el valor deseado, mientras que el voltaje disminuye a medida que aumenta el valor del pH. Lo anterior mencionado se ve representado en la siguiente figura.

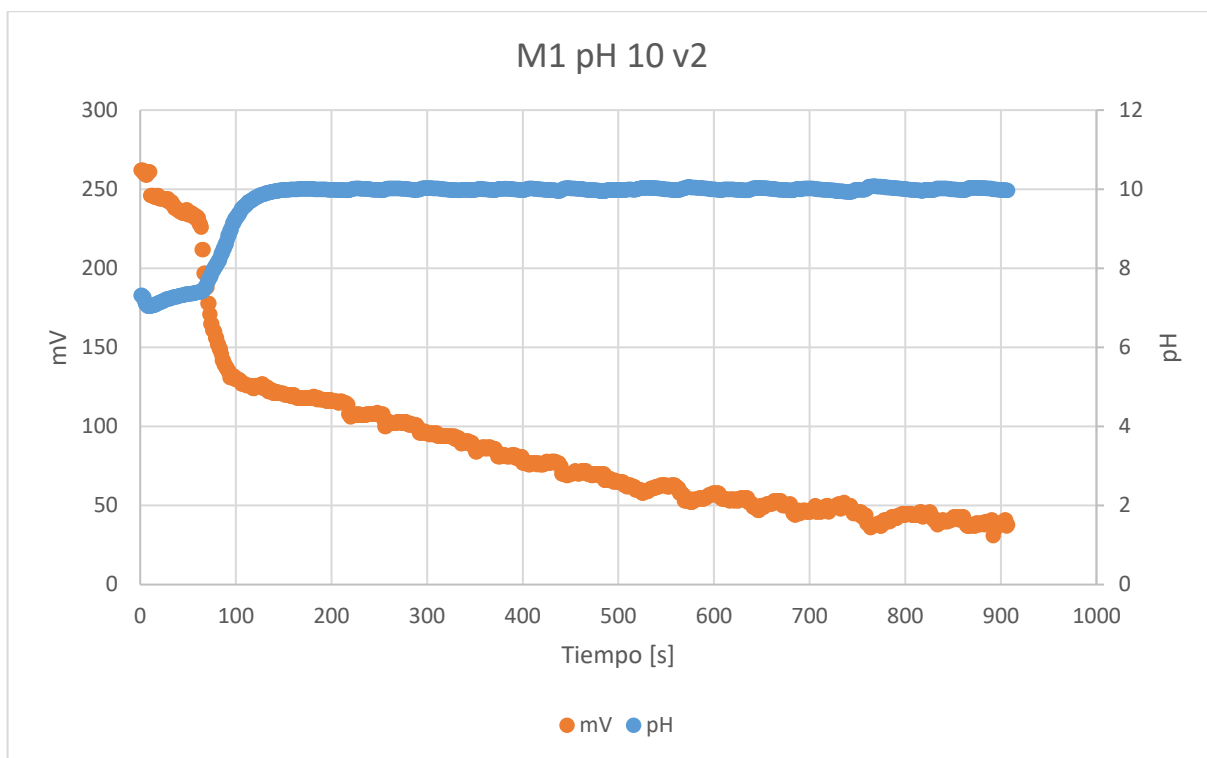


Figura 35 pH y voltaje en el tiempo M1 pH 10 v2

Un factor por destacar es cuando se busca mantener el pH 11, donde se llega a valores de voltaje negativos, cercanos al cero.

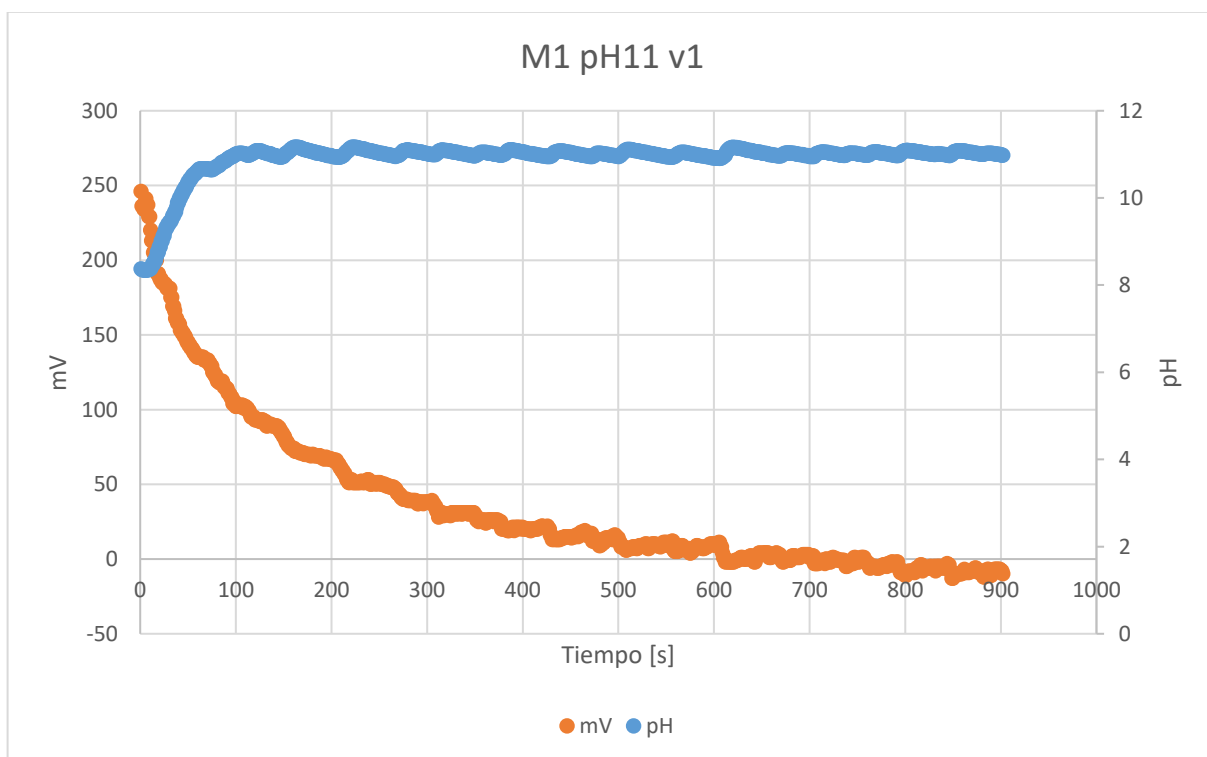


Figura 36 pH y voltaje en el tiempo M1 pH 11 v1

En los casos donde no existe control de pH, el comportamiento consiste en un pequeño ajuste en el comienzo, subiendo levemente su valor, hasta que comienza a descender constantemente en el tiempo, estabilizándose lentamente. El comportamiento del voltaje es similar, descendiendo en el tiempo junto al pH, pero sin acercarse al cero como en otros casos.

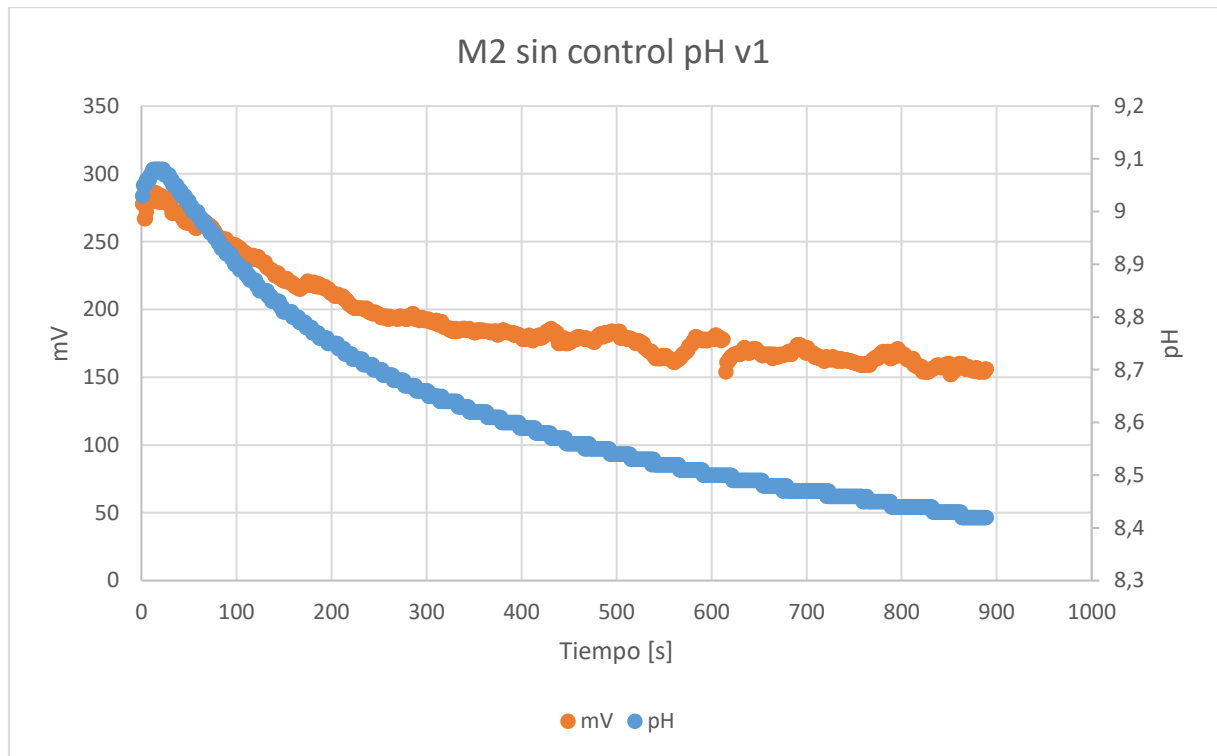


Figura 37 pH y voltaje en el tiempo M2 sin control pH v1

Finalmente, al procesar medios cromados el comportamiento es el mismo, mostrándose en la siguiente figura.

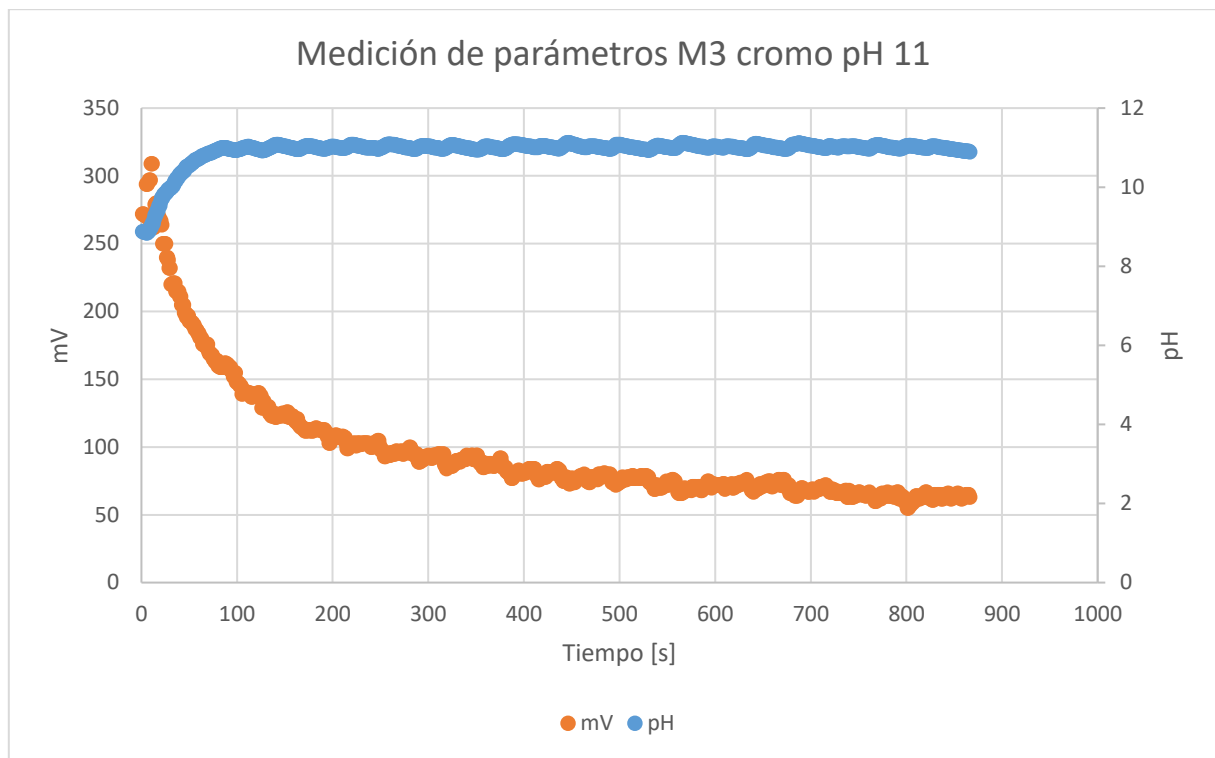


Figura 38 ph y voltaje en el tiempo M3 medios cromados pH 11

El registro del comportamiento de pH y voltaje en el tiempo de todos los experimentos se encuentran en Anexo Elaboración de curvas de consumo de cal.

4.4 Relación entre superficie expuesta y consumo de cal en el tiempo

El último análisis por realizar el comparar el consumo de cal en el tiempo con el área de superficie expuesta. El área expuesta se calcula asumiendo que varía de manera similar a como varía el P80, con eso, se calcula a partir de la estimación del número de partículas con las siguientes fórmulas:

Ecuación 1 Obtención número de partículas

$$\text{número de partículas} = \frac{\text{peso muestra}}{\text{densidad} * \text{volumen}} = \frac{\text{peso muestra}}{\text{densidad} * \frac{4}{3} * \pi * r^3}$$

Ecuación 2 Área expuesta

$$\text{Área expuesta} = \text{número de partículas} * 4 * \pi * r^2$$

Desarrollando el área expuesta y relacionándola linealmente con el consumo de cal para mantener el pH constante se obtienen ajuste como muestra la Figura 39.

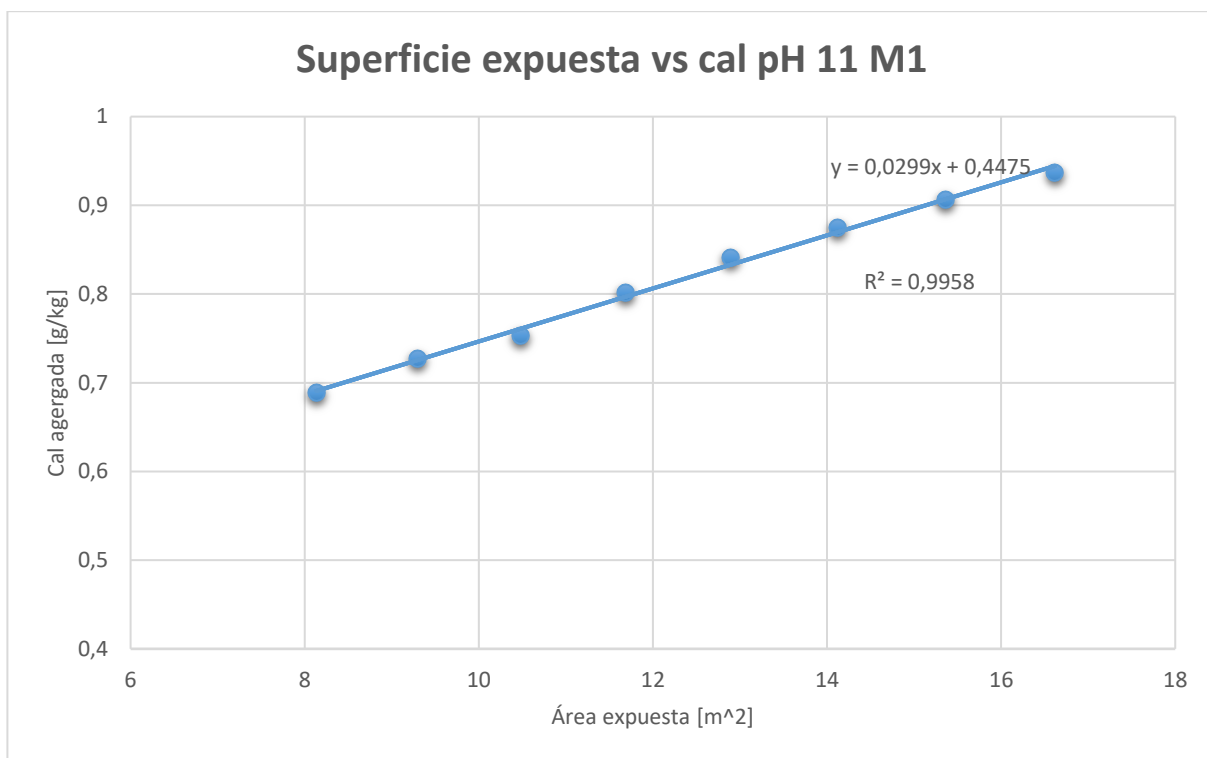


Figura 39 Relación superficie expuesta vs cal M1 pH 11

Al realizar la regresión en cada uno de los escenarios se llegan a los valores presentados desde la Tabla 12 hasta la Tabla 15:

Tabla 12 Resumen ajuste lineal pH 11

pH 11	R ²	Pendiente
M1	0,9958	0,029
M2	0,9887	0,021
M3	0,9904	0,033

Tabla 13 Resumen ajuste lineal pH 10,5

pH 10,5	R ²	m
M1	0,9938	0,029
M2	0,9906	0,021
M3	0,9926	0,024

Tabla 14 Resumen ajuste lineal pH 10

pH 10	R ²	m
M1	0,9937	0,015
M2	0,9933	0,010
M3	0,9847	0,015

Tabla 15 Resumen ajuste lineal pH 9,5

pH 9,5	R ²	m
M1	0,9440	0,009
M2	0,9708	0,01
M3	0,9875	0,009

Las regresiones lineales fueron realizadas con los puntos de consumo de cal en el tiempo disponible. Provocando que sean 8 los puntos concretos disponibles. Además, al ser el pH de la pulpa similar en todos los casos, no se considera la variable de punto de partida al realizar el modelo. El desarrollo del ajuste lineal y todos los supuestos utilizados se encuentran en Anexo Ajuste lineal.

5. Discusiones

5.1 Validación material y consumo de cal en el tiempo

La preparación del material permite asegurar que granulométricamente cada muestra es representativa de su respectiva unidad geológica, provocando que los resultados de los experimentos posteriores sean comparables entre sí desde la perspectiva de distribución granulométrica. El único margen de error posible se podría tratar de que existiese una concentración extraordinaria de un compuesto en alguna muestra, pero se considera despreciable para motivos del análisis químico de lo que ocurre dentro de la molienda.

En el proceso de construcción de la cinética de molienda, se puede observar en la Figura 20, Figura 21 y Figura 22 el ajuste para calcular el p80 correspondiente a cada unidad geológica. El valor de los coeficientes de Pearson de M1, M2 y M3 es de 0,99; 0,94 y 0,96 respectivamente, pudiendo afirmarse que el ajuste numérico es el correcto y se ajusta a los datos experimentales.

Sin embargo, el ajuste numérico posee limitaciones debido a que se trata de un ajuste potencial, en los casos de que el tiempo de molienda se acerque a cero el valor del P80 predicho se acerca a los 4.500 [μm], lo que no es posible porque toda la muestra se encuentra bajo malla #6, es decir, 3.360 [μm]. Lo anterior mencionado afecta en que el ajuste no es válido para todos los tiempos de molienda, sino que solo es responsable utilizarlo entre los tiempos de molienda en los cuales fue ajustado, generando que cuando se busque relacionar el consumo de cal con la superficie expuesta en el tiempo solo se pueda realizar entre los márgenes de tiempo medidos, es decir, desde los 8 hasta los 20 minutos.

5.2 Relación entre superficie expuesta y consumo de cal en el tiempo

En la estimación de superficie expuesta según el tiempo se realiza el supuesto de que el comportamiento y disminución del diámetro de las partículas es homogéneo en el tiempo, lo cual provoca que el valor encontrado sea correcto para estimar el comportamiento de la superficie expuesta, pero no un resultado exacto del experimento. A pesar de lo anterior, es la estimación del comportamiento lo necesario para relacionarlo con el consumo de cal en el tiempo.

Sobre el consumo de cal en el tiempo, se puede observar en la Figura 23 que el consumo de cal en un comienzo es alto y a medida que avanza la molienda se va estabilizando. El comportamiento es similar para los otros consumos, marcando la diferencia en la estabilidad en el consumo de cal. Para los casos de pH más bajo, el crecimiento del consumo de cal es menor en un comienzo y una vez comienza a estabilizarse posee crecimientos escalonados en vez de una curva. Esto es debido a que para mantener un pH a valor 9,5 es necesario una menor cantidad de cal y se mantiene más tiempo estable, provocando que se note la diferencia de consumo al no agregarse en todos los puntos de medición, en cambio, para mantener un pH más alto, el consumo de cal es constante, entregando la forma de curva.

A pesar de existir diferencia en la cantidad de consumo, la forma en que la cal era consumida utilizando los medios cromados es similar a la detectada cuando se usaban medios de acero. Haciendo que la diferencia química de los medios de molienda no afecte en el comportamiento del consumo de cal en el tiempo, aunque sí puede llegar a afectar la cantidad de cal necesaria.

La explicación del comportamiento descrito se puede dar tomando en cuenta las interacciones agua-roca, que definen el carácter químico de la solución, por lo cual, se espera que a medida que se vaya liberando el mineral, este va a reaccionar modificando el pH a la misma tasa que la superficie entra en contacto con el agua. Por como se observa en la Figura 37, el pH disminuye hasta encontrar un punto estable en el tiempo al no existir un control durante la molienda, similar a lo observado en la cinética de molienda (Figura 20, Figura 21 y Figura 22) en donde el diámetro de partícula disminuye hasta mantenerse relativamente constante, implicando que el área superficial crezca hasta estabilizarse. Entonces, para el consumo de cal durante la molienda, se espera que esta sea proporcional a la liberación de las especies en el tiempo, existiendo de esa manera una relación lineal entre ambos.

Al realizar la comparación entre la superficie expuesta y el consumo de cal como se presenta en la Figura 39, se obtiene una relación lineal con un coeficiente de Pearson igual a 0,99. Lo anterior significa que en dicho caso existe una relación directa entre la superficie expuesta y el consumo de cal. Analizando al realizar el mismo ejercicio con las muestras a diferentes pH en las Tabla 12, Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15 se ve que la relación es lineal en todos los casos. Además, en las tablas se muestra que el valor de la pendiente en la recta es similar cuando se busca mantener a un mismo pH, aun cuando cada unidad geológica posee un tiempo de molienda distinto.

Lo anterior mencionado significa que el consumo de cal se comporta según lo esperado, en donde a medida que se activa el núcleo se es necesario agregar cal en proporciones similares con el fin de mantener el pH constante. Esto se ve corroborado cuando la tasa de consumo de cal depende del pH deseado aun cuando se trabaja a distintos tiempos de molienda para llegar al mismo diámetro. Es por ello que se puede afirmar que el cambio de pH en el tiempo se ve afectado por la activación del núcleo del mineral y con ello el consumo de cal es dependiente de las reacciones superficiales que ocurren durante la molienda.

Otro factor por considerar del ajuste numérico realizado es que la relación entre las pendientes para los pH mayores a 9,5 es similar. Esto se ve reflejado en que el valor de M2 es menor comparado a las otras dos unidades geológicas. Lo anterior mencionado puede tener diferentes explicaciones, como la presencia mayor de feldespatos o el consumo total de cal. De todas formas, por la cantidad de información disponible, que es de ocho puntos de medición por experimento, no es posible encontrar una tasa de consumo o extrapolar a otras unidades geológicas con el fin de determinar el consumo de cal a partir de su composición mineralógica u otra variable que conlleve un modelamiento numérico.

5.3 Curvas de consumo de cal

Se elaboran todas las curvas de consumo de cal mediante el método tradicional y controlando parámetros. El comportamiento de las curvas es el esperado, es decir, el consumo de cal será mayor a medida que se aumente el pH controlado, junto que a partir del pH 10 aumenta la cal requerida debido al efecto buffer por utilizar agua de mar desalinizada. Finalmente, se observa que el consumo de cal es distinto para las curvas elaboradas mediante el método tradicional con respecto a las elaboradas controlando el pH durante la molienda.

En la Figura 24 y en la Figura 33 se puede apreciar que, controlando parámetros, el consumo de cal no difiere significativamente entre unidad geológica, sin importar los medios de molienda utilizados. Como se muestra en la Tabla 10 el consumo es levemente mayor en el caso de control de pH para M3, luego M2 y el menor es en M1 con consumos de 1.17, 1,02 y 0.93 gramos de cal por kilogramos de mineral respectivamente. De igual forma, si se comparan las curvas de consumo de cal elaboradas mediante el método tradicional, representadas en la Figura 29 y en la Figura 34, tampoco se detectan diferencias significativas entre las distintas unidades geológicas, con un consumo mayor para M2, luego M3 y finalmente M1 con valores de 1.95, 1.82 y 1.40 respectivamente.

Que el consumo de cal sea similar para las tres unidades geológicas al utilizar un mecanismo de estimación de consumo de cal se puede deber a dos factores. En primer lugar, como muestra la Tabla 5, no existe una diferencia significativa en su composición mineralógica y, en segundo lugar, todas las muestras son molidas a un igual tamaño de P80, provocando que el grado de liberación sea similar en todos los casos, teniendo un comportamiento reactivo con los mismos resultados.

Al comparar el consumo de cal para una misma unidad geológica y modificando la metodología de evaluar el consumo de cal como muestran la Figura 30, Figura 31 y Figura 32, el consumo de cal es menor al controlar el pH durante la molienda comparado a controlar el pH una vez terminado el proceso. El fenómeno también ocurre al controlar el pH utilizando medios cromados. La diferencia en el consumo de cal va a depender de cada experimento. Tomando los datos presentados en la Tabla 9 y en la Tabla 10 se determina que en el caso de utilizar medios de acero, el consumo de cal es siempre mayor utilizando el método tradicional, siendo 33% mayor para M1, 52% mayor para M2 y un 35% mayor para M3. De igual forma, para medios cromados el consumo es de 8% mayor en M1, 45% mayor en M2 y 35% mayor en M3. La diferencia mencionada significa una sobreestimación al determinar el consumo de cal con el método tradicional comparado a cuando se controlan los parámetros durante la molienda, alejándose así de la realidad industrial. Se recomienda entonces a utilizar el control de parámetros en los estudios de laboratorio si se desea tener un mejor entendimiento químico del sistema.

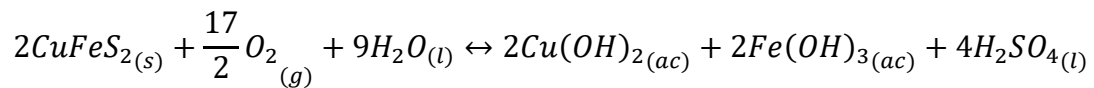
Sobre el comportamiento del pH y el potencial REDOX según el tiempo, ya se discutió del comportamiento cuando no existe control de pH durante la molienda, ocurriendo un descenso constante del pH por las arcillas presentes en el mineral que acidifican la pulpa junto a otros compuestos mientras que el voltaje disminuye como los encontrado en bibliografía. Para los casos en donde se controla los parámetros en la Figura 36 y en la Figura 38 se observa que se mantiene constante el valor del pH durante el tiempo, manteniéndose dentro del margen de error que posee el sistema de control que es de 0,1. Además, el voltaje va disminuyendo a medida que transcurre el tiempo, mostrando que están ocurriendo reacciones REDOX dentro del molino. También se observa que el pH llega a valores cercano a cero cuando el pH es 11, sin embargo, siempre se mantiene con valores positivos. Finalmente, cabe destacar que el comportamiento es el mismo sin importar los medios de molienda utilizados.

La disminución constante del voltaje en el tiempo muestra que, si bien se está inyectando aire constantemente el molino, el medio se vuelve más reductor y ocurren menos reacciones de oxidación. Al ser los valores siempre positivos, va a ocurrir que las reacciones de oxidación ocurran en menor magnitud, pero no dejarán de ocurrir.

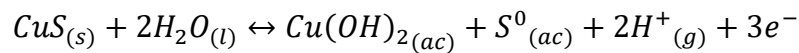
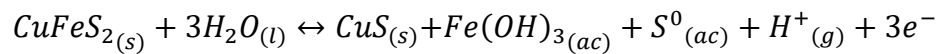
Considerando que el consumo de cal difiere significativamente dependiendo si se controla el pH durante o post molienda y que el consumo de cal está directamente relacionado con la liberación de las especies presentes, provocando que la diferencia se pueda explicar a partir de la interacción agua-roca dentro del molino y las principales reacciones que ocurren dentro de este.

Desde el punto de vista de los diagramas Eh vs pH (Figura 16 y Figura 17), a medida que aumenta el pH la parte de la calcopirita superficial se oxida generando óxido de cobre (CuO), dejando una solución de sulfuros y disminuyendo la posibilidad de ser parte del efecto galvánico. Además, la calcopirita reacciona formando hidróxido de cobre. El fenómeno ocurre debido a que todavía se opera con voltajes positivos, permitiendo reacciones de oxidación todavía.

El que exista una menor cantidad de calcopirita al aumentar el pH de la solución provocaría, en primer lugar, que ocurran en menor magnitud la reacción que genera ácido sulfúrico:

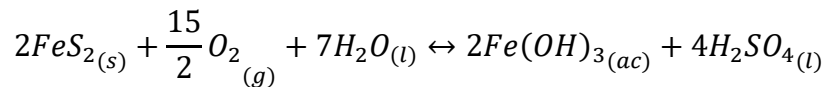


Además, disminuiría la magnitud del efecto galvánico, liberándose menos protones de las semirreacciones (Recordar que las ecuaciones REDOX presentadas son de una especie debido que puede reaccionar con otros compuestos metálicos presentes):

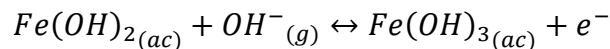
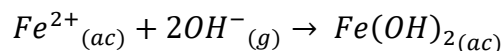


Es importante considerar que las dos reacciones anteriormente mencionadas afectarían negativamente la flotación futura debido que el hidróxido de cobre (Cu(OH)₂) no flota. Esto debe ser en baja magnitud debido a que no se ha estudiado como una problemática en la eficiencia de la flotación.

Por otro lado, está la disociación de la pirita, la cual reacciona formando hidróxido de cobre que puede precipitar en el tiempo, pudiendo generar ácido sulfúrico si es que sigue el siguiente mecanismo de reacción:



Sin embargo, al disminuir la pirita superficial, disminuye también el efecto galvánico sobre los medios de molienda, generando posteriormente una menor precipitación férrica, proceso que también disminuye el valor del pH:



Generando así un menor desgaste de los medios de molienda, corroborándose también lo realizado en la industria. El hidróxido férrico que no es generado por el efecto galvánico puede ser

generado por la oxidación de la pirita y además por la presencia de hierro disuelto proveniente de compuestos presentes en el mineral.

El efecto galvánico, que provoca una disminución del pH y depósitos de hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) en la superficie se ve reducido cuando se opera con control de pH. El impacto de esta reacción se puede considerar importante debido a los medios de acero corresponden a 15 [kg] en masa, diez veces más que la masa de mineral que son 1,5 [kg].

Además, está la reacción de los feldspatos, los cuales reaccionan generando protones en caso de exceso de feldspatos con respecto a la caolinita y moscovita. En medios alcalinos la reacción se desplaza hacia la formación de feldspatos, acidificando el medio.

A partir del análisis de la pirita y la calcopirita, el tener controlado el pH durante la molienda provoca no solo una menor generación de ácidos, sino que también disminuye el efecto galvánico que desgasta los medios de molienda y se genera la reacción del hidróxido férrico que disminuye el pH. Por el lado de los feldspatos, el consumo de cal debiese ser mayor por tender a acidificar en ambientes alcalinos, sin embargo, al ser menor el consumo de cal empírico, la reacción no debe preponderar por sobre las que alcalinizan la solución.

Si bien el control de pH durante el proceso de molienda puede disminuir el consumo de cal con el fin de alcalinizar la solución, se ha registrado que la precipitación férrica afecta negativamente a la flotación futura, provocando la necesidad de estudiar la eficiencia del proceso de flotación para poder definir la pertinencia del ahorro generado.

Otra limitación del estudio es el desconocimiento de la composición química exacta del mineral al final del proceso y el grado de liberación de las especies, convirtiéndose en una estimación cuales son los principales fenómenos que afectan la molienda, pudiendo entrar otros actores como minerales de menor concentración.

Además, en condiciones de laboratorio se dan idealidades que no se dan en la industria, provocando que el equilibrio químico analizado no sea el mismo al encontrado en la planta. Fenómenos que pueden afectar puede ser el nivel aireación efectiva que ocurre, considerando el flujo constante de 8 [l/s] de aire presente, puede ser también la diferenciación granulométrica, la concentración de minerales en zonas específicas del molino de bolas, entre otros.

Las posibles implicancias del control de parámetros durante la molienda van desde reducción en los costos de experimentación por un menor consumo de cal, junto a un menor desgaste de los medios de molienda y afectar negativamente la flotación futura. Significando que sea necesario seguir profundizando la química de la molienda, determinando como varía el fenómeno en distintas unidades geológicas y escalando el experimento con el fin de poseer un comportamiento químico más cercano a lo que ocurre en la industria.

No se puede concluir sobre lo que ocurre exactamente durante la molienda, pero se logra un mejor entendimiento con el cual profundizar y analizar un mecanismo de implementar el concepto a gran escala.

6. Conclusión y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos se resalta la relación empírica entre el consumo de cal y la superficie expuesta de la partícula, obteniendo coeficientes de Pearson con valores cercanos a 0,98 promedio, implicando que la química de la molienda y la variación del pH depende directamente de la activación del núcleo y de la reacción agua-roca que ocurre.

Al medir las curvas de consumo de cal mediante dos metodologías distintas, se detecta que el consumo de cal controlando el pH durante la molienda es menor comparado a como se realiza tradicionalmente que es controlar el pH posterior a la molienda, con valores 33%, 52% y 35% mayor en M1, M2 y M3 respectivamente si se utilizan medios de acero y con valores de 8%, 45% y 35% mayor en M1, M2 y M3 respectivamente si se usan medios cromados. significando que al agregar después del proceso genere una sobreestimación de la cal necesaria.

Se analizan las muestras con QEMScan y se detecta que un 60% del mineral es compuesto por cuarzo, feldespatos y arcillas, teniendo también una alta presencia de pirita y calcopirita. Se estima que las principales reacciones agua-roca que van a ocurrir durante la molienda corresponde a la oxidación de la pirita y la calcopirita, junto a las respectivas reacciones que provocarán la formación de ácidos como ácido sulfúrico. Además, se generará efecto galvánico que desgasta los medios de molienda y además acidifica la solución. Por otro lado, está el cuarzo que se espera que no reaccione debido que comienza a reaccionar desde temperaturas cercanas a los 100°C. Finalmente, los feldespatos reaccionan con la caolinita liberando protones que acidifican el proceso.

Se espera que la disminución del efecto galvánico, junto a la no generación de ácidos al operar la molienda en pH alcalino sean los factores claves que justifican el menor consumo de cal al controlar pH durante la molienda.

Las limitaciones del experimento realizado consisten en el desconocimiento de la química superficial posterior a la molienda, quitando precisión a lo que ocurre durante el proceso. Además, se desconocen los efectos directos que tendrá implementar el control de pH durante la molienda en la flotación a posterior.

Se recomienda para futuras investigaciones evaluar la composición química del producto de la molienda frente a las distintas metodologías con el fin de un entendimiento más exacto de las reacciones que ocurren en la superficie de la roca. Además, se recomienda estudiar la implicancia que posee la metodología con la flotación futura y su eficiencia. Por otro lado, se recomienda, considerando que existe base teórica suficiente, estudiar el consumo de cal en el tiempo a partir de un conocimiento más detallado de los minerales expuestos en el tiempo con el fin de ver si es posible determinar el consumo de cal en el tiempo a partir de un modelo matemático o empírico. Finalmente, se recomienda utilizar el control de parámetros durante la molienda con el fin de tener resultados más cercanos a la industria desde una perspectiva de magnitud y comportamiento químico si se desea relacionar con el proceso siguiente de flotación.

Se logra el objetivo general de entender de mejor manera el comportamiento químico del proceso de molienda a partir del consumo de cal en el escenario de controlar el pH posterior a la molienda y en el caso de hacerlo durante esta.

7. Bibliografía

- [1] Constanza Ramos, “PIB no minero repuntaría 3,1% en 2018 impulsado por comercio y servicios”, *Pulso*, 2018.
- [2] Banco Central de Chile, “CUENTAS NACIONALES DE CHILE”, Santiago, 2018.
- [3] COCHILCO, “Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales”, Santiago, 2017.
- [4] Consejo de Competencias Mineras, “Procesamiento de sulfuros de cobre: proceso de Concentrado”, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.ccm.cl/sulfuros-de-cobre/>. [Accedido: 20-dic-2018].
- [5] Comisión chilena del Cobre, “Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre”, Santiago, 2017.
- [6] Minería Chilena, “La cal: insumo estratégico - Minería Chilena”, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.mch.cl/reportajes/la-cal-insumo-estrategico/#>. [Accedido: 27-ago-2019].
- [7] J. Concha y E. Wasmund, “Flotación de Finos y Gruesos Aplicada a la Recuperación de Minerales de Cobre”, 2016.
- [8] C. J. Greet, G. L. Small, P. Steinier, y S. R. Grano, “The Magotteaux Mill: investigating the effect of grinding media on pulp chemistry and flotation performance”, *Miner. Eng.*, vol. 17, n° *Miner. Eng.*, pp. 891–896, 2004.
- [9] F. K. Mulenga, “Sensitivity analysis of Austin’s scale-up model for tumbling ball mills — Part 2. Effects of full-scale milling parameters”, *Powder Technol.*, vol. 317, pp. 6–12, jul. 2017.
- [10] T. Maksimainen, S. Luukkanen, P. Mörsky, y R. Kalapudas, “The effect of grinding environment on flotation of sulphide poor PGE ores”, *Miner. Eng.*, vol. 23, pp. 908–914, 2010.
- [11] J. Liu, H. Long, K. C. Corin, y C. T. O’Connor, “A study of the effect of grinding environment on the flotation of two copper sulphide ores”, *Miner. Eng.*, vol. 122, pp. 339–345, jun. 2018.
- [12] Alejandro López Valdivieso y Juan Luis Reyes Bahena, “Flotacion de calcopirita, piritita y molibdenita en minerales de cobre topo pórfidos”.
- [13] S. Castro, “Challenges in flotation of Cu-Mo sulfide ores in sea water”, en *Water in Mineral Processing—Proc. of the First International Symposium (J. Drelich, Ed.)*, 2012, pp. 29–40.
- [14] W. J. Trahar, “A rational interpretation of the role of particle size in flotation”, *Int. J. Miner. Process.*, vol. 8, n° 4, pp. 289–327, 1981.
- [15] Codelco Educa, “Codelco Educa | Molienda”, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.codelcoeduca.cl/site/edic/base/port/molienda.html>. [Accedido: 24-dic-2018].
- [16] E. Ruisánchez, E. J. Juárez-Pérez, A. Arenillas, J. M. Bermúdez, y J. Á. Menéndez, “Molienda asistida con microondas de un coque metalúrgico”, *Rev. Metal.*, vol. 50, n° 2, p. e013, jun. 2014.
- [17] N. Q. Silva, “Estudio de puesta en marcha para molino de bolas y planta de flotación en minera cerro negro”, Pontificie Universidad Católica de Valparaíso, 2015.
- [18] W. M. Tejada Estay, “Análisis Dinámico de Molino SAG”, Universidad de Chile, 2010.
- [19] W. Kracht, “MI5021 – Ingeniería del Procesamiento de Minerales”, Santiago, Chile, 2014.
- [20] P. C. Rivera, A. Echavarría Velásquez, G. Jaime Gómez, y J. Arismendi, “Evaluación de la corrosión galvánica en amalgamas dentales de alto contenido de cobre por medio de técnicas electroquímicas Evaluation of the galvanic corrosion of high copper dental amalgams by means of electrochemical techniques”, *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, vol. 45, pp. 77–86, 2008.

- [21] Plataforma Educativa Aragonesa, “Electroquímica o galvánica”, *Gobierno de Aragón*, 2014. [En línea]. Disponible en: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4912/html/22_electroquimica_o_galvnica.html. [Accedido: 24-dic-2018].
- [22] C. Ojeda Escamilla, E. Romo Rojas, J. F. Medina Castilleja, y J. L. Reyes Bahena, “Caracterización mineralógica aplicada al proceso de beneficio de minerales”, *XXVI Conv. Int. Minería*, n° Octubre, pp. 295–300, 2005.
- [23] P. M. Lois Morales, “Interacción agua/roca durante molienda e impactos fisicoquímicos y geoquímicos en la flotación: Caso pórfido Escondida”, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, 2010.
- [24] J. Pena y M. J. Gimeno, “Modelización cinética de la interacción agua-roca”, *Estud. Geol.*, vol. 50, n° 5–6, pp. 387–396, 1994.
- [25] Néstor Ricardo Rojas-Reyes, Luver Echeverry-Vargas, y Jesús Cataño-Martínez, “Characterization by QEMSCAN and FE-SEM of ore bodies gold artisanally treated with mercury in Antioquia, Colombia”, *Prospectiva*, vol. 15, pp. 107–116, 2017.
- [26] A. Macías-García, E. M. Cuerda-Correa, y M. . Díaz-Díez, “Application of the Rosin–Rammler and Gates–Gaudin–Schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork”, *Mater. Charact.*, vol. 52, n° 2, pp. 159–164, may 2004.
- [27] John O’M. Bockris y Amulya K. N. Reddy, *Electroquímica moderna. I - John O’M. Bockris, Amulya K. N. Reddy - Google Books*, 1ª ed. 1979.
- [28] F. Chandía y S. Hernández, “CORROSIÓN DEL HIERRO EN DISTINTOS TIPOS DE AGUAS: UNA PROPUESTA EXPERIMENTAL”, Concepción, 2009.
- [29] Axel W, “Introduction to Ion-selective Measurement”, 2009. [En línea]. Disponible en: https://us.vwr.com/assetsvc/asset/en_US/id/7979405/contents. [Accedido: 01-oct-2018].
- [30] W. J. Williams, *Handbook of anion determination*, First Edit. Butterworths, 1979.
- [31] Y. Umezawa, P. Bühlmann, K. Umezawa, K. Tohda, y S. Amemiya, “); E. Lindner (Hungary, 1998-1999); S. Rondinini-Cavallari (Italy, 1992-1999); K. Stulík (Czech Republic, 1989-1997); Y. Umezawa (Japan, 1992-1999)”, F. Kadirgan (Turkey, 2000.
- [32] E. Bakker, “Generalized Selectivity Description for Polymeric Ion-Selective Electrodes Based on the Phase Boundary Potential Model.”, *J. Electroanal. Chem. (Lausanne. Switz).*, vol. 639, n° 1–2, pp. 1–7, feb. 2010.
- [33] Competence Center Titration y Metrohm International Headquarters, “Titrimetric determination of sulfate”, *Application Bulletin 140/4r*, pp. 1–15, 2011.
- [34] N. Takeno, “Atlas of Eh-pH diagrams Intercomparison of thermodynamic databases”, 2005.
- [35] A. Azizi, S. Z. Shafaei, M. Noaparast, y M. Karamoozian, “Galvanic Interaction between Chalcopyrite and Pyrite with Low Alloy and High Carbon Chromium Steel Ball”, *J. Chem.*, vol. 2013, pp. 1–9, 2013.
- [36] M. K. YELLOJI RAO y K. A. NATARAJAN, “Factors Influencing Ball Wear and Flotation With Respect to Ore Grinding”, *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, vol. 7, n° 3–4, pp. 137–173, abr. 1991.
- [37] E. S. P. B. V, M. K. Y. Rao, y K. A. Natarajan, “Effect of Galvanic Interaction between Grinding Media and Minerals on Sphalerite Flotation”, *Int. J. Miner. Process.*, vol. 27, pp. 95–109, 1989.
- [38] E. E. D. Villena, “Modelamiento Geometalúrgico Del Consumo De Medios De Molienda Basado En Técnicas De Caracterización Avanzada”, Universidad de Chile, 2017.
- [39] Fernando Patricio Morales Ampuero, “ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS INTERACCIONES DEL SISTEMA ‘AGUA DE MAR – CAL’ EN PROCESAMIENTO DE MINERALES”, Universidad de Chile, 2017.

- [40] Cinda Beltrán Ortiz y Napoleón Jacinto Eulate, “Aplicación de microburbujas en la flotación de lodos de tratamiento de aguas ácidas de mina Parte I: neutralización y floculación”, *Serv. Pers. Artic. Artic. en PDF Artic. en XML Ref. del artículo Como citar este artículo Traducción automática Enviar Artic. por email Indicadores Links Relac. Bookmark |Otros Rev. Met. UTO*, vol. 31, pp. 31–38, 2012.
- [41] G. Zamora Echenique, V. Z. Mercado, y M. Gorrity, “Propuesta de tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni mediante drenes anóxicos calizos Proposal for the treatment of the acid waters from Milluni mine with anoxic limestone drains”, *Rev. Met.*, vol. 36, pp. 1–8, 2015.
- [42] Medical-Expo, “Molino de bolas / de laboratorio - J-BM1, J-BM1-S - Jisico”, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.medicalexpo.es/prod/jisico/product-84729-571303.html>. [Accedido: 24-dic-2018].
- [43] Magotteaux, “Laboratory grinding – Magotteaux Mill® | Magotteaux”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.magotteaux.com/products/laboratory-grinding-magotteaux-millr>. [Accedido: 24-dic-2018].
- [44] D. R. Kester, I. W. Duedall, D. N. Connors, y R. M. Pytkowicz, “Limnology & Oceanography”, 1967.
- [45] Codelco, “BioSigma patentó la bacteria Wenelén”, 2010. [En línea]. Disponible en: https://www.codelco.com/cgi-bin/prontus_imprimir.cgi?_URL=http%3A//www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20110402/pags/20110402222943.html. [Accedido: 04-sep-2019].
- [46] I. O. Hinojosa, “OXIDACION DE SULFUROS: IMPORTANTE PROCESO DE PRETRATAMIENTO”, *Rev. Met.*, vol. 23, pp. 1–11, 2002.
- [47] R. P. Hackl, *The leaching and passivation of chalcopyrite in acid sulfate media*. University of British Columbia, 1995.
- [48] L. Valderrama, M. Santander, O. Pavez, M. Guevara, C. Castillo, y P. Humeres, “CARACTERIZACIÓN DE PIRITA CONTENIDAS EN RELAVES DE COBRE”, *Rev. la Fac. Ing.*, vol. 26, pp. 58–64, 2011.
- [49] F. R. C. Pedroza, M. D. J. S. Aguilar, T. P. Treviño, A. M. Luévanos, y M. S. Castillo, “Treatment of sulfide minerals by oxidative leaching with ozone”, *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, vol. 33, n° 4, pp. 269–279, 2012.
- [50] C. Owusu, D. Fornasiero, J. Addai-Mensah, y M. Zanin, “Effect of regrinding and pulp aeration on the flotation of chalcopyrite in chalcopyrite/pyrite mixtures”, *Powder Technol.*, vol. 267, pp. 61–67, 2014.
- [51] E. Forbes, L. Smith, y M. Vepsalainen, “Effect of pyrite type on the electrochemistry of chalcopyrite/pyrite interactions”, *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 54, n° 4, pp. 1116–1129, 2018.
- [52] J. ORTIZ, S. BARBATO, y J. L. GAUTIER, “REDUCCION DEL OXIGENO SOBRE CALCOSITA, PIRITA Y GALENA EN MEDIO ALCALINO”, *Boletín la Soc. Chil. Química*, vol. 45, n° 3, pp. 441–448, sep. 2000.
- [53] R. L. Pozzo, A. S. Malicsi, y I. Iwasaki, “Pyrite-pyrrhotite-grinding media contact and its effect on flotation”, *Mining, Metall. Explor.*, vol. 7, n° 1, pp. 16–21, feb. 1990.
- [54] X. CHENG y I. IWASAKI, “Pulp Potential and Its Implications to Sulfide Flotation”, *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, vol. 11, n° 4, pp. 187–210, dic. 1992.
- [55] University of Wahington, “Water-rock reactions: Constructing a phase diagram for feldspar weathering”, Washington, 2015.
- [56] V. Hock y F. Koller, “Variables Controlling Epidote Composition in Hydrothermal and Low-Pressure Regional Metamorphic Rocks Welche Variablen kontrollieren die

Epidotzusammensetzung 3 . Variables Controlling Epidote Composition 2 . Chemical Composition and Site Occupancy”, *Neukirchen am grobvenediger*, nº September 1990, pp. 17–25, 1993.

- [57] D. Moa, “Modelo Matemático Para Describir La Distribución Granulométrica De La Fase Dispersa De Las Suspensiones De Laterita”, *Tecnol. Química*, vol. XXIX, pp. 83–91, 2009.
- [58] Lenntech, “Elementos químicos ordenados por su masa atómica”, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/tabla-peiodica/masa-atmica.htm>. [Accedido: 30-ago-2019].
- [59] I. Cerda Bernal, “LEYES Y DENSIDAD DE MINERALES”.

8. Anexos

8.1 Anexo Preparación de material

8.1.1 Preparación de material: Metodología

La preparación de material conlleva de tres grandes procesos. El primer proceso consiste en el chancado de material. En segundo lugar, la separación de material y en tercer lugar el proceso de validación de la muestra mediante un análisis granulométrico.

8.1.1.1 Chancado y tamizaje

Se chanca para que todo quede bajo malla #6 con el siguiente método:

1. Chancado con equipo de laboratorio con Setting para malla #6
2. Tamizaje posterior de todo el producto para asegurar diámetro de corte
3. El material que no pasa por la malla se vuelve a procesar
4. Remanente fue llevado a pulverizador con el fin de aprovechar todo el material (<100 gr pulverizados por 5 segundos)

El equipo utilizado se trata de un chancador a escala de laboratorio mostrado en la siguiente imagen:



Figura 40 Laboratorio a escala de laboratorio

8.1.1.2 Separación del material

La separación de material tiene un especial cuidado porque debe pasar una auditoría futura. Es por ello que se realiza una doble separación con el cortador rotatorio considerando que se debían

procesar alrededor de 60 [kg] de cada unidad geológica. Con esas consideraciones se llega al siguiente procedimiento:

1. Se utiliza cortador rotatorio para separar cada muestra geológica
2. Una vez cortados se generan 5 baldes utilizando extremos opuestos
3. Los cinco baldes se vuelven a colocar en el cortador y se vuelven crear 5 baldes usando los extremos opuestos
4. Se separan los baldes de 15 kilos con el cortador y se elaboran las bolsas de 1,5 kilos con las que se trabajará. En caso de no tener los kilogramos necesarios se procede a:
 - a. Se corta uno de los baldes y las partes resultantes se reparten entre los otros baldes.
 - b. De aún no calzar, se vuelve a cortar el remanente (incremento mínimo: un capacho del cortador)

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de la forma en que se seleccionan los capachos de extremos distintos, dejando en claro que son 5 baldes dado a que se trabajan con 10 capachos:

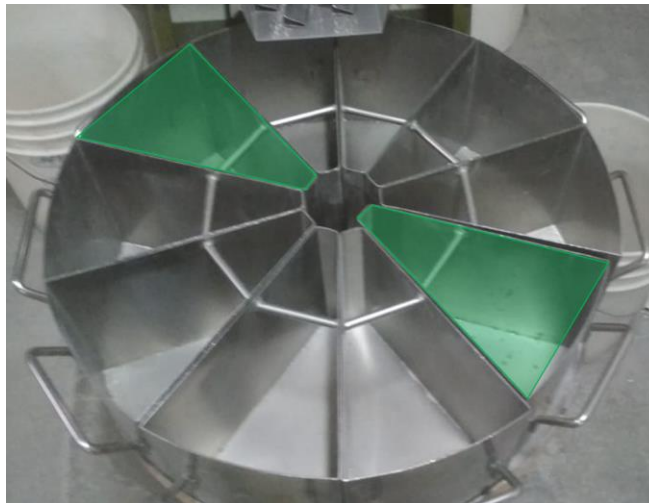


Figura 41 Ejemplo selección capachos cortador rotatorio

8.1.1.3 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico es utilizado para validar que todas las muestras separadas sean comparables entre si. Se llega a la siguiente metodología:

1. Tomar una bolsa aleatoria de cada balde
2. Tamizar a distintos diámetros y medir la masa restante en cada tamiz

Para el proceso se utiliza una torre de tamices con los siguientes tamaños:

Tabla 16 Tamices a utilizar distribución granulométrica

Malla	Diámetro de partícula [μm]
6	3360
8	2380
10	2000
12	1680
16	1190
20	841
30	595
50	297
70	210
100	149
140	105
200	74
270	53
325	44
400	37
Fondo	

8.1.2 Preparación de material: Resultados

Luego de chancar todas las muestras, se procede a la separación de las muestras y validación del proceso.

8.1.2.1 Separación del material

Se masa cada muestra separada buscando que su masa sea lo más cercano a 1500 [g]. Se presenta los pesos de cada una de las muestras:

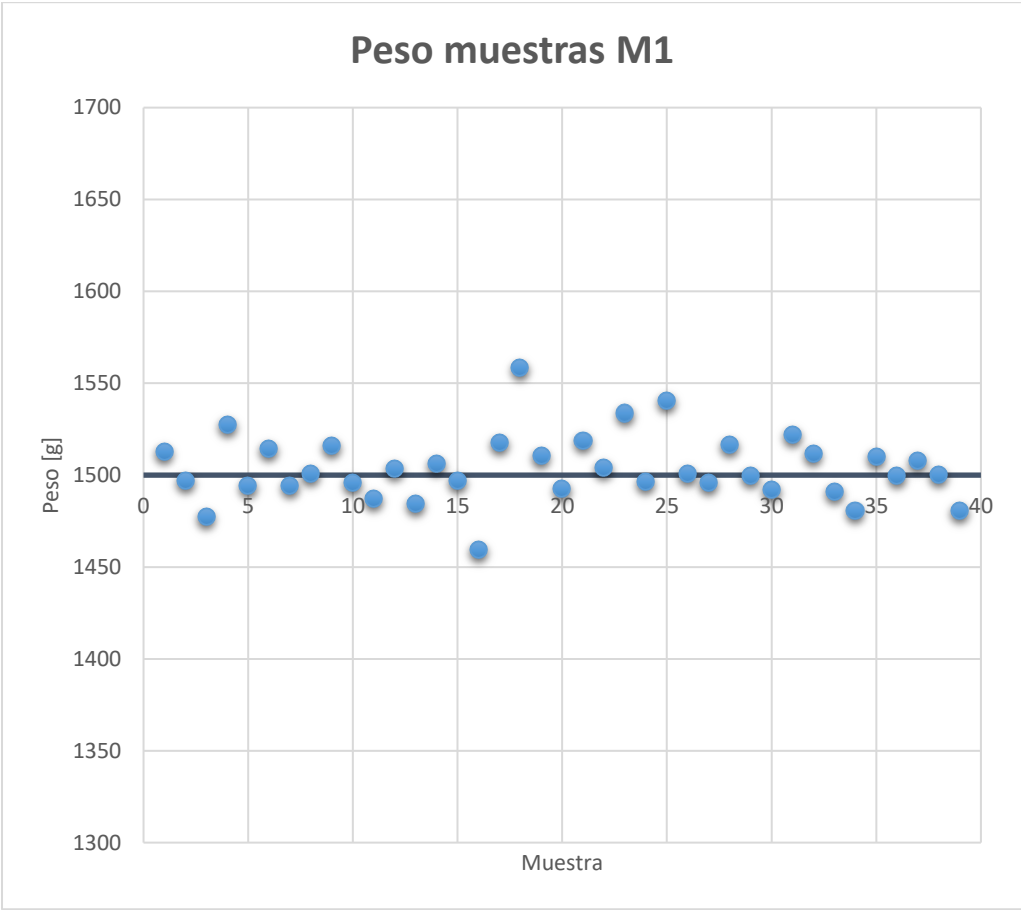


Figura 42 Peso muestras M1

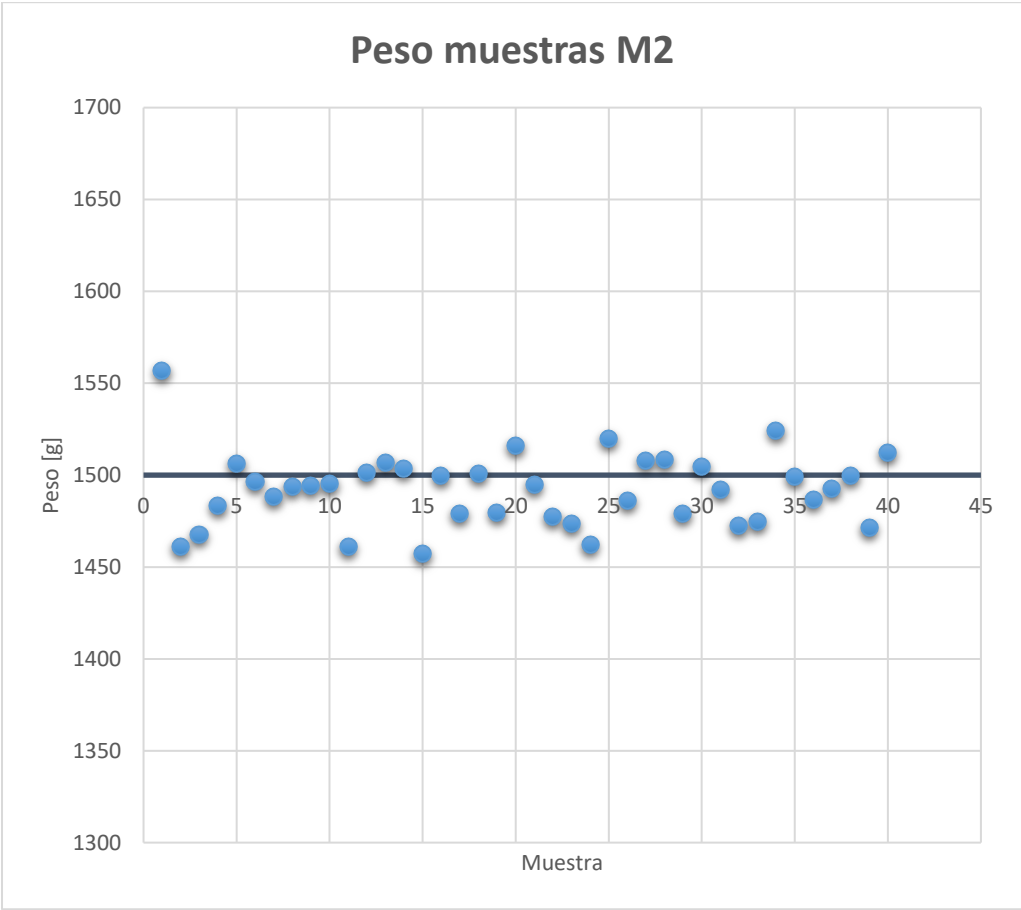


Figura 43 Peso muestras M2

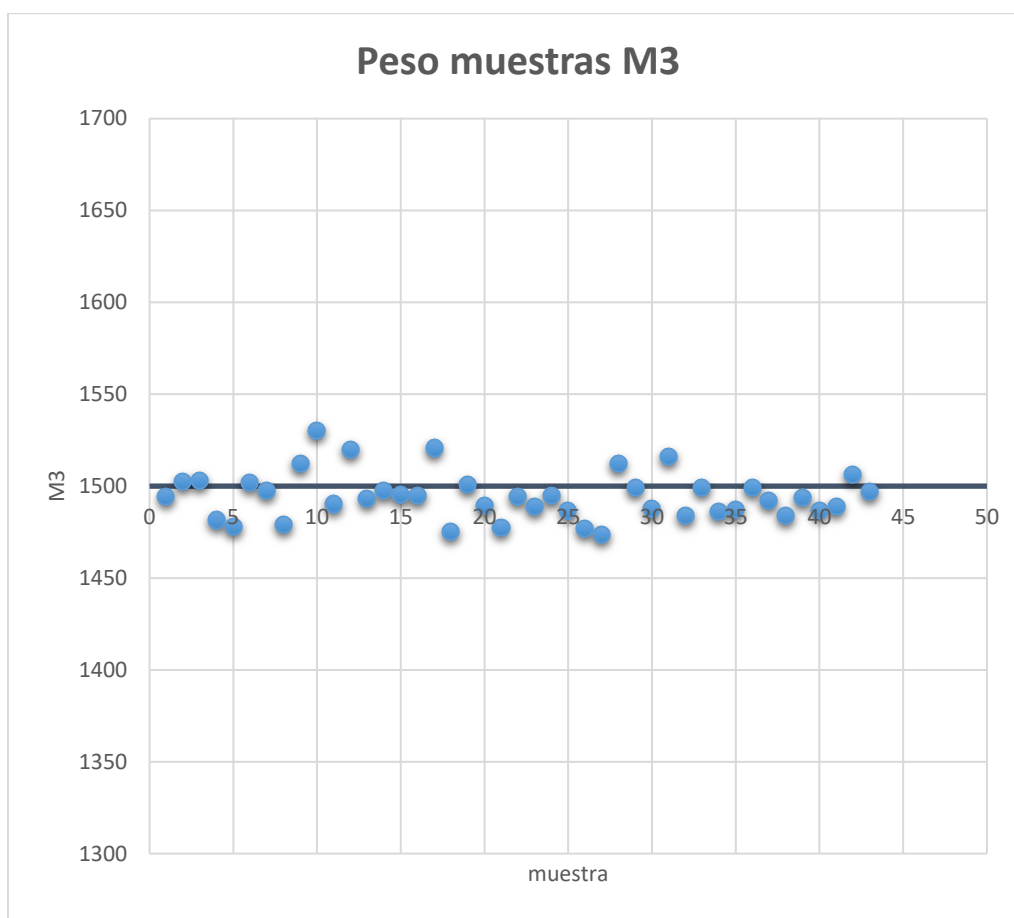


Figura 44 Peso muestras M3

El peso de las muestras y su distribución se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 17 Resumen distribución muestras

	M1	M2	M3
Promedio	1503,8	1492,1	1494,6
Mediana	1500,9	1494,0	1493,9
Desv Est	18,2	20,0	12,8
Min	1459,1	1457,0	1473,7
Max	1558,4	1557,0	1530,1
% error max	3,9%	3,8%	2,0%

Estando todo en un margen aceptable por la institución, se procede al análisis granulométrico.

8.1.2.2 Análisis granulométrico

Se tamizan las muestras según metodología y se llegan a las siguientes curvas de distribución granulométrica en cada escenario:

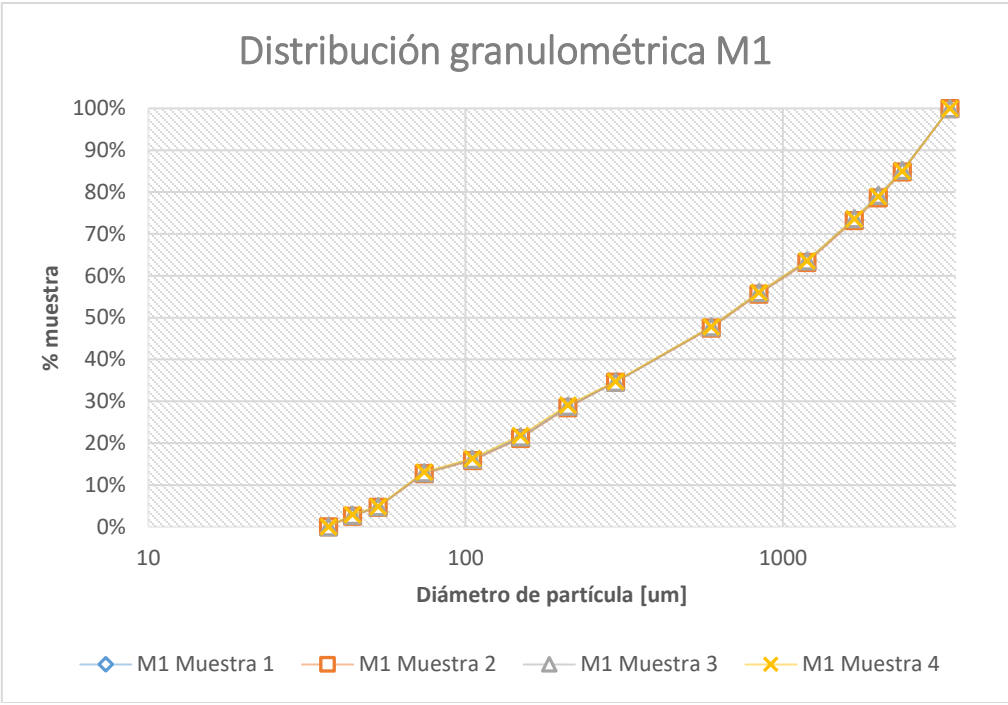


Figura 45 Distribución granulométrica M1

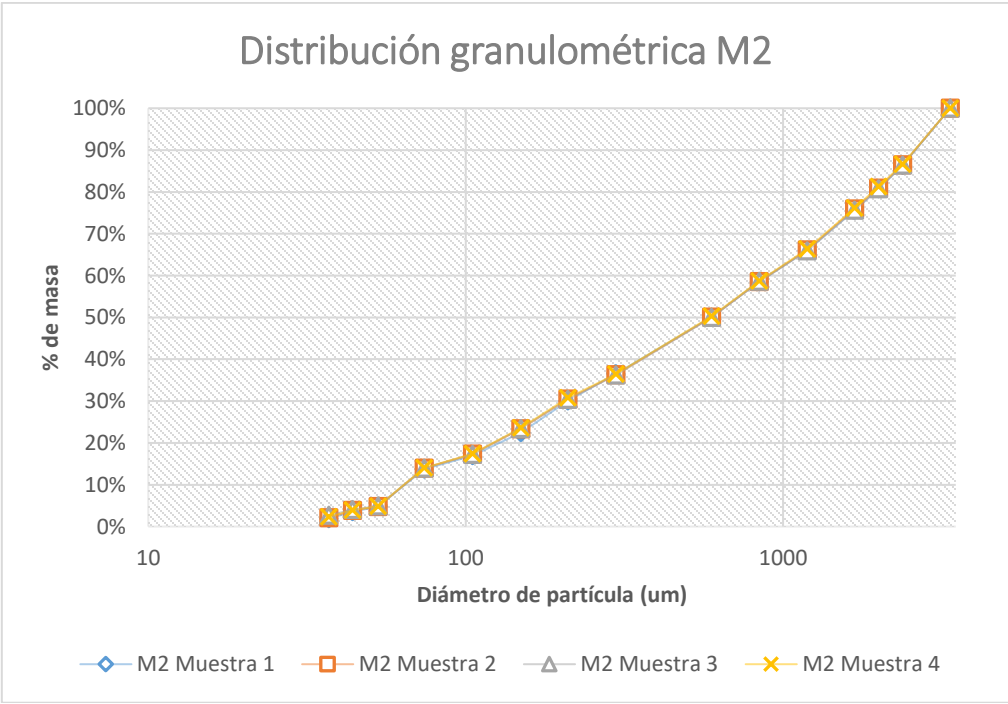


Figura 46 Distribución granulométrica M2

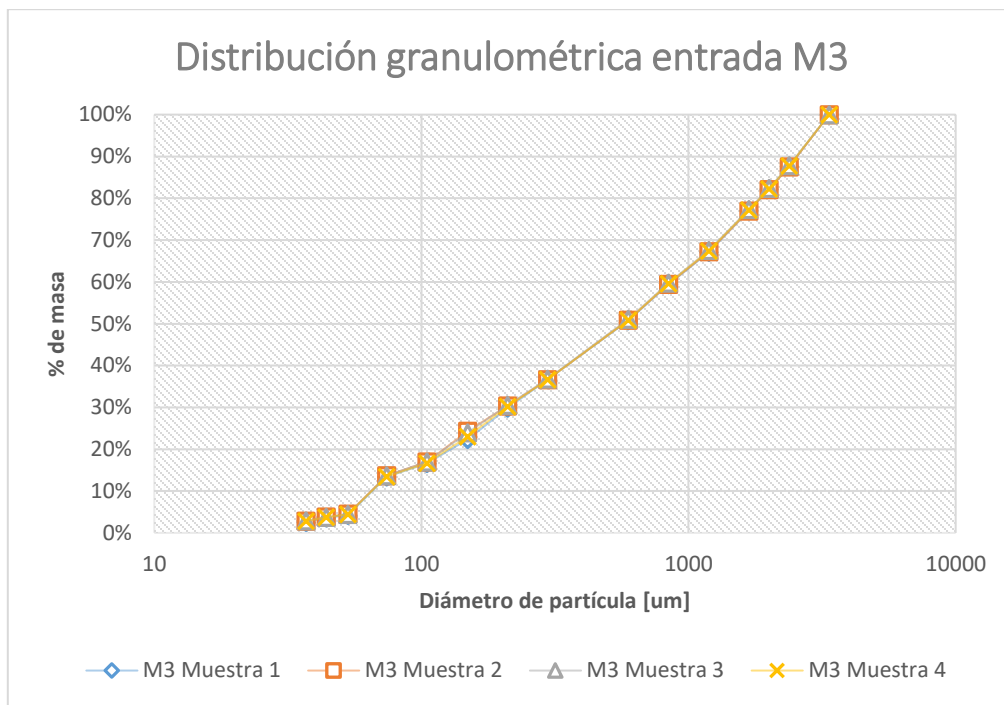


Figura 47 Distribución granulométrica M3

Mostrando que no existen diferencias significativas entre las distintas curvas, llegando al punto que se superponen entre sí. De esa manera, se valida el procedimiento de separación de muestras.

8.2 Anexo Cinética de molienda

8.2.1 Cinética de molienda: Metodología

Se debe procesar las muestras para conocer el P80 frente a distintos tiempos de molienda. Para ello los pasos a seguir son:

1. Procesar cuatro muestras distintas de las UG a diferentes tiempos de molienda. Los tiempos a procesar son: 8, 11, 15 y 20 minutos.
2. Deslamar el producto de las moliendas
3. Tamizar y calcular el P80 frente a cada tiempo de molienda
 - a. Considerando la distribución que mejor se ajusta, siendo en este caso la distribución Gaudin-Schuhman, utilizado principalmente para partículas finas se estima el valor exacto del P80 [57]. Esto se realiza realizando una interpolación en escala logarítmica:

Ecuación 3 Igualdad distribución Gaudin-Schuhman

$$\frac{\log(M_1) - \log(M_2)}{\log(\%_1) - \log(\%_2)} = \frac{\log(M_1) - \log(M_x)}{\log(\%_1) - \log(\%_x)}$$

Despejando

Ecuación 4 Igualdad distribución Goudin-Shuhman despejada

$$\log(M_x) = [\log(\%_1) - \log(\%_x)] * \left(\frac{\log(M_1)}{\log(\%_1) - \log(\%_x)} - \frac{\log(M_2) - \log(M_1)}{\log(\%_1) - \log(\%_2)} \right)$$

Con

$\%_1$ = Porcentaje de muestra acumulado al punto 1

$\%_2$ = Porcentaje de muestra acumulado al punto 2

$\%_x$ = Porcentaje de muestra acumulado deseado

M_1 = Masa acumulada al punto 1

M_2 = Masa acumulada al punto 2

M_x = Masa acumulada al porcentaje deseado

4. Ajustar curva de cinética de molienda con los cuatro puntos con un ajuste potencial.
5. Estimar con curva tiempo para llegar a un P80 de malla 200
6. Repetir procedimiento con el quinto punto medido
7. Volver a ajustar la curva de cinética de molienda y determinar tiempo a procesar

8.2.2 Cinética de molienda: resultados

Siguiendo según metodología, se realiza la distribución granulométrica de los distintos productos al moler en cada tiempo. Se resaltan los puntos que se encuentran cercanos al P80:

Tabla 18 Distribución granulométrica M1 8 minutos

M1 8 minutos						
Malla	Tamaño en micrón	Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	547,5	485,4	62,1	62,1	96%
10	2000	504,2	485,5	18,7	80,8	95%
12	1680	449,6	434,7	14,9	95,7	94%
16	1190	425,3	397,9	27,4	123,1	92%
20	841	429,4	404,8	24,6	147,7	90%
30	595	447,8	404	43,8	191,5	87%
50	297	551,3	364,4	186,9	378,4	75%
70	210	522,4	361,1	161,3	539,7	64%
100	149	493	347,5	145,5	685,2	55%
140	105	478,2	327,7	150,5	835,7	45%
200	74	438,8	325,7	113,1	948,8	37%
270	53	426,1	336,5	89,6	1038,4	31%
325	44	546,1	487,3	58,8	1097,2	28%
400	37	352,9	322,4	30,5	1127,7	26%
Fondo		742	355,4	386,6	1514,3	0%

Tabla 19 Distribución granulométrica M1 11 minutos

M1 11 minutos						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	526,8	485,4	41,4	41,4	97%
10	2000	499,7	485,5	14,2	55,6	96%
12	1680	446,2	434,9	11,3	66,9	96%
16	1190	418,4	397,9	20,5	87,4	94%
20	841	422,2	405	17,2	104,6	93%
30	595	438,8	404,2	34,6	139,2	91%
50	297	519,9	364	155,9	295,1	80%
70	210	517,9	361,2	156,7	451,8	70%
100	149	509,3	347,8	161,5	613,3	59%
140	105	499	328	171	784,3	48%
200	74	447,7	325,7	122	906,3	39%
270	53	432,5	336,6	95,9	1002,2	33%
325	44	541,5	487,5	54	1056,2	29%
400	37	345,2	322,5	22,7	1078,9	28%
Fondo		772,7	354,9	417,8	1496,7	0%

Tabla 20 Distribución granulométrica M1 15 minutos

M1 15 minutos						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	505,3	485,2	20,1	20,1	99%
10	2000	491,9	485,6	6,3	26,4	98%
12	1680	439,9	434,6	5,3	31,7	98%
16	1190	407,9	397,9	10	41,7	97%
20	841	410,5	404,7	5,8	47,5	97%
30	595	411,7	403,9	7,8	55,3	96%
50	297	429,9	364,2	65,7	121	92%
70	210	503	361,2	141,8	262,8	83%
100	149	535,5	347,6	187,9	450,7	70%
140	105	550	327,9	222,1	672,8	56%
200	74	482,7	325,6	157,1	829,9	46%
270	53	475,5	336,5	139	968,9	37%
325	44	549,1	487,2	61,9	1030,8	33%
400	37	368	322,4	45,6	1076,4	30%
Fondo		805,7	354,8	450,9	1527,3	0%

Tabla 21 Distribución granulométrica M1 20 minutos

M1 20 minutos						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	495,6	485,3	10,3	10,3	99%
10	2000	488,6	485,5	3,1	13,4	99%
12	1680	437,3	434,6	2,7	16,1	99%
16	1190	401,9	397,9	4	20,1	99%
20	841	408,8	404,9	3,9	24	98%
30	595	416,9	403,9	13	37	98%
50	297	405,1	364,1	41	78	95%
70	210	422	361,2	60,8	138,8	91%
100	149	475,5	347,6	127,9	266,7	82%
140	105	537,5	327,9	209,6	476,3	68%
200	74	494,1	325,6	168,5	644,8	57%
270	53	482,8	336,8	146	790,8	47%
325	44	567,7	487,5	80,2	871	42%
400	37	364,5	322,4	42,1	913,1	39%
Fondo		939,3	355	584,3	1497,4	0%

Tabla 22 Distribución granulométrica M2 8 minutos

M2 8 minutos						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	548,5	485,3	63,2	63,2	96%
10	2000	506,3	485,5	20,8	84	94%
12	1680	450,9	343,5	107,4	191,4	87%
16	1190	429,1	398	31,1	222,5	85%
20	841	432,2	404,7	27,5	250	83%
30	595	450,2	403,8	46,4	296,4	80%
50	297	544,3	364,1	180,2	476,6	68%
70	210	513,2	361,1	152,1	628,7	58%
100	149	484,8	347,7	137,1	765,8	49%
140	105	470	327,8	142,2	908	39%
200	74	430,5	325,5	105	1013	32%
270	53	414,3	336,4	77,9	1090,9	27%
325	44	544,5	487,1	57,4	1148,3	23%
400	37	355,1	322,7	32,4	1180,7	21%
Fondo		668,5	354,8	313,7	1494,4	0%

Tabla 23 Distribución granulométrica M2 11 minutos

M2 11 minutos						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	517,6	485,1	32,5	32,5	98%
10	2000	496,5	485,4	11,1	43,6	97%
12	1680	444,7	434,7	10	53,6	96%
16	1190	417,7	397,9	19,8	73,4	95%
20	841	422,2	404,7	17,5	90,9	94%
30	595	437	403,8	33,2	124,1	92%
50	297	502,1	364	138,1	262,2	82%
70	210	507,8	361,2	146,6	408,8	72%
100	149	498,2	347,7	150,5	559,3	62%
140	105	493,3	327,7	165,6	724,9	51%
200	74	445,6	325,6	120	844,9	43%
270	53	425,1	336,4	88,7	933,6	37%
325	44	541,6	487,2	54,4	988	33%
400	37	346,2	322,2	24	1012	32%
Fondo		826,2	354,7	471,5	1483,5	0%

Tabla 24 Distribución granulométrica M2 15 minutos

M2 15 minutos						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	500,6	485,3	15,3	15,3	99%
10	2000	490,5	485,6	4,9	20,2	99%
12	1680	438,7	434,8	3,9	24,1	98%
16	1190	406,6	398	8,6	32,7	98%
20	841	411,4	404,8	6,6	39,3	97%
30	595	420,5	404	16,5	55,8	96%
50	297	446,1	364	82,1	137,9	91%
70	210	468,8	361,4	107,4	245,3	84%
100	149	500,3	347,5	152,8	398,1	73%
140	105	522,5	327,8	194,7	592,8	60%
200	74	472	325,4	146,6	739,4	51%
270	53	473,3	336,7	136,6	876	41%
325	44	539,4	487,3	52,1	928,1	38%
400	37	357,2	322,3	34,9	963	36%
Fondo		887,2	354,7	532,5	1495,5	0%

Tabla 25 Distribución granulométrica M2 20 minutos

M2 20 minutos						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	494,6	485,2	9,4	9,6	99%
10	2000	488,5	485,4	3,1	12,7	99%
12	1680	436,7	434,6	2,1	14,9	99%
16	1190	401,3	397,8	3,5	18,6	99%
20	841	408,1	404,7	3,4	23	99%
30	595	413,1	404	9,1	37,2	98%
50	297	397,9	364,2	33,7	82,1	95%
70	210	422,8	361,4	61,4	151,2	90%
100	149	472,5	348	124,5	288,2	81%
140	105	526,2	327,9	198,3	505,6	68%
200	74	487,1	325,6	161,5	682,5	56%
270	53	471,8	336,6	135,2	827,3	47%
325	44	551,2	487,3	63,9	899,5	42%
400	37	360,1	322,2	37,9	940	40%
Fondo		359	343,8	15,2	1557	0%

Tabla 26 Distribución granulométrica M3 8 minutos

M3 8 minutos						
Malla	Tamaño en micrón	Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	530,5	484,9	45,6	45,6	96%
10	2000	501,5	485	16,5	62,1	94%
12	1680	447	434,2	12,8	74,9	93%
16	1190	422,3	397,5	24,8	99,7	91%
20	841	423	404,3	18,7	118,4	89%
30	595	444,2	403,4	40,8	159,2	85%
50	297	548,8	363,8	185	344,2	68%
70	210	519,8	360,7	159,1	503,3	53%
100	149	487,7	347,2	140,5	643,8	40%
140	105	471,1	327,3	143,8	787,6	27%
200	74	427,2	325,2	102	889,6	17%
270	53	411,5	315,3	96,2	985,8	8%
325	44	539,7	486,8	52,9	1038,7	3%
400	37	345,3	322,1	23,2	1061,9	1%
Fondo		366,4	354,5	11,9	1073,8	0%

Tabla 27 Distribución granulométrica M3 11 minutos

M3 11 minutos						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	510,2	485,3	24,9	24,9	98%
10	2000	493,8	485,4	8,4	33,3	98%
12	1680	442,1	434,6	7,5	40,8	97%
16	1190	412,4	397,7	14,7	55,5	96%
20	841	416,9	404,7	12,2	67,7	95%
30	595	431,1	404,1	27	94,7	94%
50	297	490,8	363,9	126,9	221,6	85%
70	210	510,8	361,2	149,6	371,2	75%
100	149	502,8	347,7	155,1	526,3	64%
140	105	497,3	327,7	169,6	695,9	53%
200	74	450,1	325,5	124,6	820,5	45%
270	53	436,6	336,6	100	920,5	38%
325	44	534,8	487,2	47,6	968,1	35%
400	37	344,5	322,1	22,4	990,5	33%
Fondo		843	354,5	488,5	1479	0%

Tabla 28 Distribución granulométrica M3 15 minutos

M3 15 minutos						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	495,1	485,3	9,8	9,8	99%
10	2000	488,8	485,5	3,3	13,1	99%
12	1680	438,3	434,9	3,4	16,5	99%
16	1190	403,5	397,8	5,7	22,2	99%
20	841	409,5	405,1	4,4	26,6	98%
30	595	418,8	404,1	14,7	41,3	97%
50	297	436,6	364,4	72,2	113,5	92%
70	210	471	361,2	109,8	223,3	85%
100	149	502,9	347,5	155,4	378,7	75%
140	105	532	327,7	204,3	583	61%
200	74	474,5	325,5	149	732	51%
270	53	463,5	336,4	127,1	859,1	43%
325	44	554,8	487,2	67,6	926,7	38%
400	37	357,1	322,2	34,9	961,6	36%
Fondo		895,5	354,8	540,7	1502,3	0%

Tabla 29 Distribución granulométrica M3 20 minutos

M3 20 minutos						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	491,3	485,3	6	6	100%
10	2000	486,9	485,4	1,5	7,5	100%
12	1680	436,2	434,5	1,7	9,2	99%
16	1190	400,3	397,7	2,6	11,8	99%
20	841	407,7	404,6	3,1	14,9	99%
30	595	414,8	403,8	11	25,9	98%
50	297	396,3	363,9	32,4	58,3	96%
70	210	420,3	361,1	59,2	117,5	92%
100	149	474,6	347,6	127	244,5	84%
140	105	536,6	327,7	208,9	453,4	70%
200	74	499,6	325,5	174,1	627,5	59%
270	53	491,9	336,5	155,4	782,9	49%
325	44	549,7	487,2	62,5	845,4	45%
400	37	356,9	322,1	34,8	880,2	42%
Fondo		1005,1	354,6	650,5	1530,7	0%

Con los datos procesados se procede a calcular el P80 en cada caso. Utilizando la información de la Tabla 29 Distribución granulométrica M3 20 minutos Tabla 29 se calcula para M3 20 minutos con la Ecuación 4 Igualdad distribución Goudin-Shuhman despejada:

$$\log(M_x) = [\log(\%_{01}) - \log(\%_{0x})] * \left(\frac{\log(M_1)}{\log(\%_{01}) - \log(\%_{0x})} - \frac{\log(M_2) - \log(M_1)}{\log(\%_{01}) - \log(\%_{02})} \right)$$

$$\log(M_x) = [\log(0,84) - \log(0,7)] * \left(\frac{\log(244,5)}{\log(0,84) - \log(0,7)} - \frac{\log(453,4) - \log(244,5)}{\log(0,84) - \log(0,7)} \right)$$

$$\log(M_x) = 2,1310$$

$$M_x = 135,22 [\mu m]$$

Desarrollando de manera similar para todos los tiempos de molienda, se llegan a los siguientes resultados:

Tabla 30 P80 a distintos tiempos de molienda M1

M1	
Tiempo molienda [min]	P80 [μm]
8,0	398,4
11,0	294,4
15,0	195,2
20,0	141,6

Tabla 31 P80 a distintos medios de molienda M2

M2	
Tiempo molienda [min]	P80 [μm]
8,0	589,8
11,0	274,8
15,0	187,0
20,0	144,0

Tabla 32 P80 a distintos tiempos de molienda M3

M3	
Tiempo molienda [min]	P80 [μm]
8,0	490,7
11,0	251,5
15,0	178,1
20,0	135,2

Con los datos recopilados se realiza un ajuste potencial y se determinan los siguientes tiempos de molienda:

Tabla 33 Tiempo de molienda aproximado proceso cinética de molienda

UG	Tiempo [min]
M1	14,8
M2	13,4
M3	13,1

Se procesa a dichos tiempos y se llega a las siguientes distribuciones granulométricas:

Tabla 34 Composición granulométrica M1 14 minutos y 47 segundos

M1 14 min 47 s						
Malla	Tamaño en micrón	Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	504,6	485,3	19,3	19,3	99%
10	2000	492,1	485,5	6,6	25,9	98%
12	1680	439,9	434,6	5,3	31,2	98%
16	1190	407,9	397,8	10,1	41,3	97%
20	841	413,5	404,8	8,7	50	97%
30	595	427,1	403,9	23,2	73,2	95%
50	297	461	364	97	170,2	89%
70	210	497,6	361,2	136,4	306,6	80%
100	149	516,9	347,7	169,2	475,8	69%
140	105	533,6	327,8	205,8	681,6	55%
200	74	474,8	325,5	149,3	830,9	45%
270	53	462,2	336,5	125,7	956,6	37%
325	44	544,1	487,3	56,8	1013,4	33%
400	37	355,2	322,1	33,1	1046,5	31%
Fondo		823,8	354,6	469,2	1515,7	0%

Tabla 35 Composición granulométrica M2 13 minutos y 22 segundos

M2 13 min 22 s						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	506,7	485,3	21,4	21,4	99%
10	2000	492,9	485,4	7,5	28,9	98%
12	1680	441,3	434,6	6,7	35,6	98%
16	1190	410,7	397,7	13	48,6	97%
20	841	415,4	404,6	10,8	59,4	96%
30	595	428,5	403,8	24,7	84,1	94%
50	297	465,2	363,9	101,3	185,4	88%
70	210	488,5	361,3	127,2	312,6	79%
100	149	510,2	347,7	162,5	475,1	68%
140	105	513,6	327,7	185,9	661	56%
200	74	466,9	325,5	141,4	802,4	46%
270	53	453,4	336,5	116,9	919,3	38%
325	44	536,1	487,3	48,8	968,1	35%
400	37	347,6	322,1	25,5	993,6	33%
Fondo		848,7	354,3	494,4	1488	0%

Tabla 36 Distribución granulométrica M3 13 minutos y 7 segundos

M3-RE 13 min 7s						
Malla		Peso medido	Peso malla	Mineral	Acumulado	
6	3360					100%
8	2380	501,4	485,2	16,2	16,2	99%
10	2000	491,4	485,4	6	22,2	99%
12	1680	439,7	435,1	4,6	26,8	98%
16	1190	406,3	397,8	8,5	35,3	98%
20	841	412,5	404,8	7,7	43	97%
30	595	426,2	404	22,2	65,2	96%
50	297	466,9	363,9	103	168,2	89%
70	210	501,1	361,2	139,9	308,1	80%
100	149	514	347,6	166,4	474,5	69%
140	105	520,9	327,7	193,2	667,7	56%
200	74	469,6	325,4	144,2	811,9	46%
270	53	461,1	336,5	124,6	936,5	38%
325	44	537,3	487,3	50	986,5	35%
400	37	347,9	322,1	25,8	1012,3	33%
Fondo		854	354,3	499,7	1512	0%

Desarrollando de similar forma que, con los primeros datos, se obtienen los P80 correspondientes a los últimos experimentos:

Tabla 37 P80 a distintos tiempos de molienda quintos puntos

UG	Tiempo [min]	P80 [μm]
M1	14,8	211,4
M2	13,4	219,2
M3	13,1	212,3

Con los últimos puntos calculados, se elaboran las curvas de consumo de cal para cada unidad geológica junto a sus ajustes numérico:

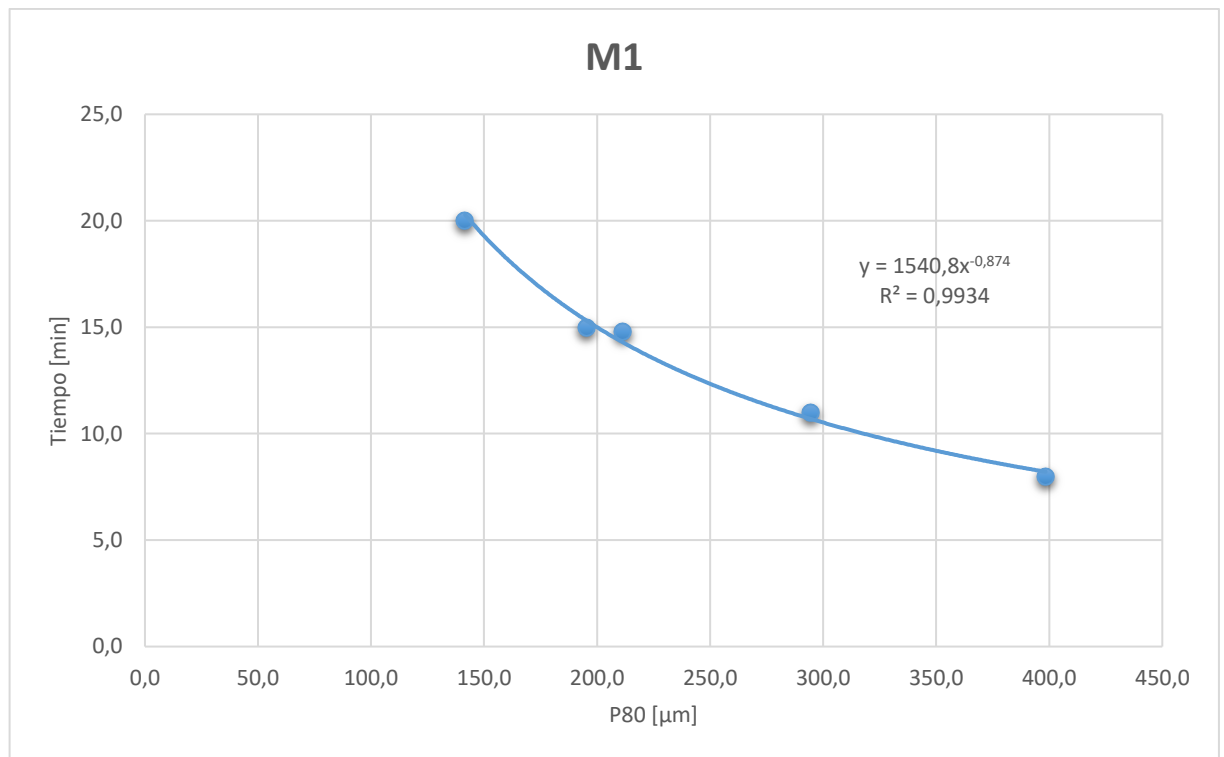


Figura 48 Cinética de molienda M1

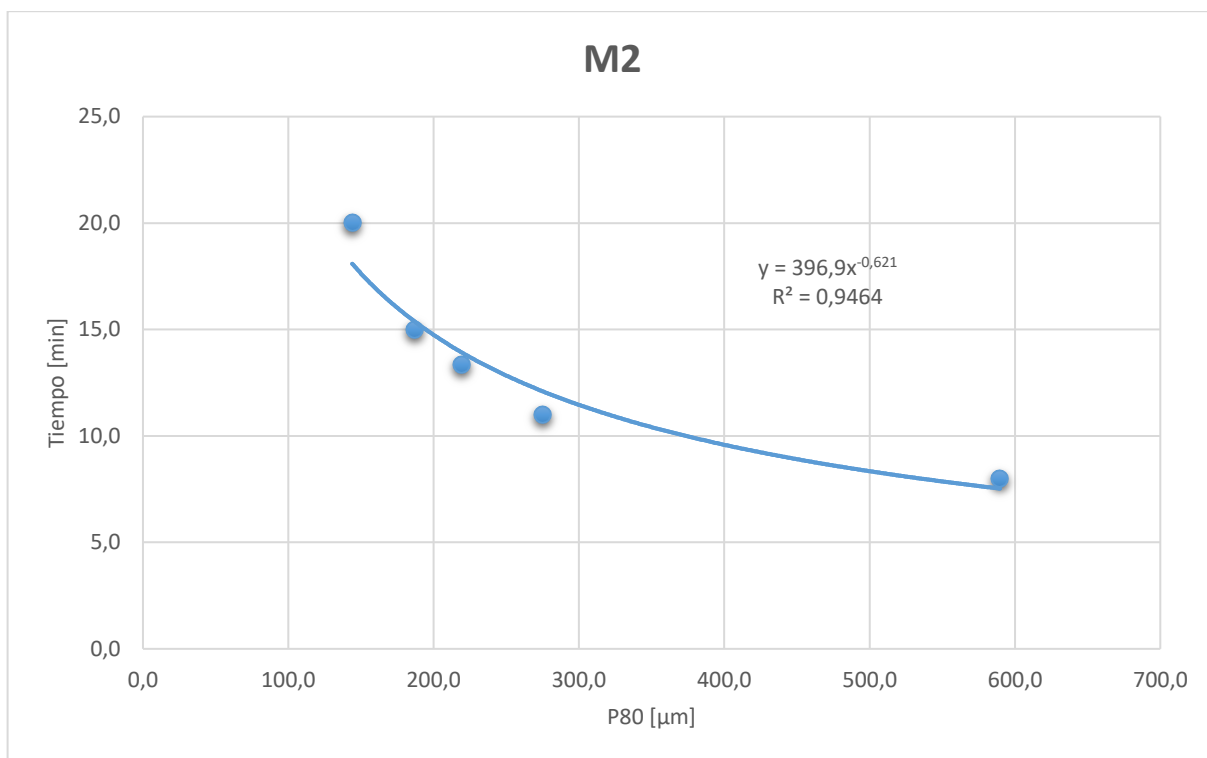


Figura 49 Cinética de molienda M2

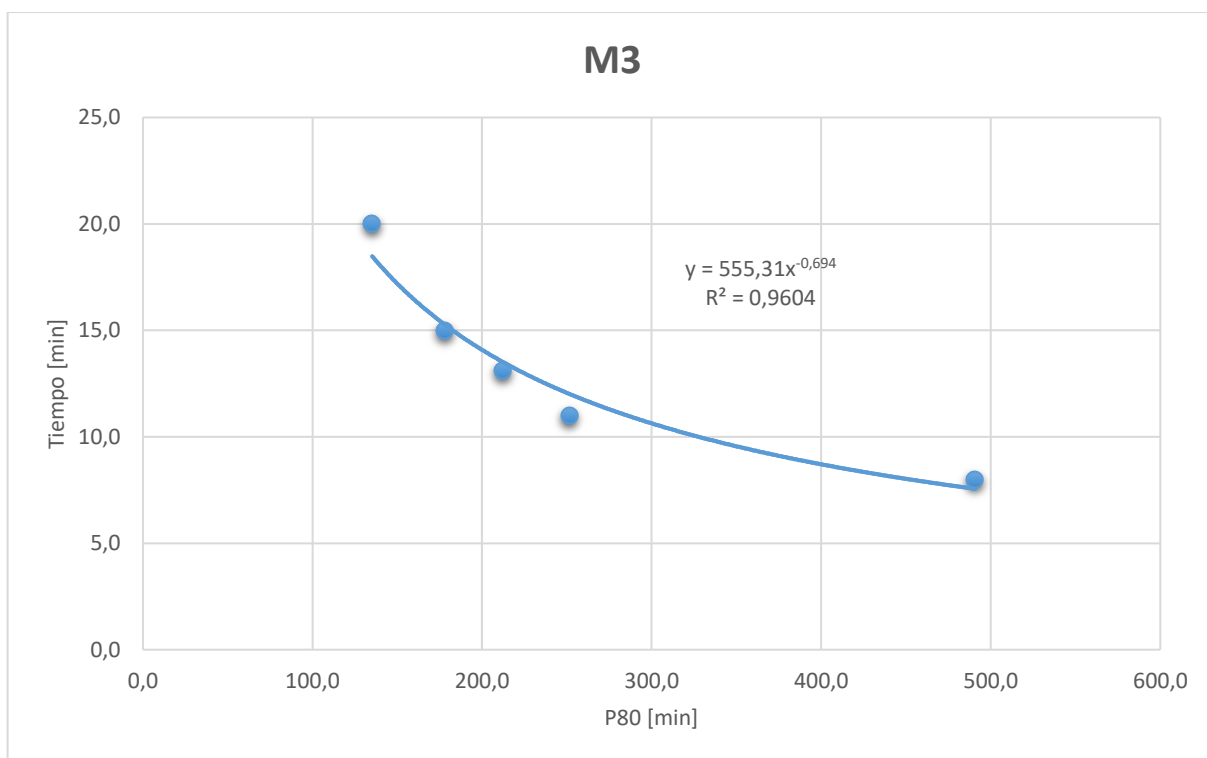


Figura 50 Cinética de molienda M3

Para la determinación de los tiempos de molienda para llegar a los 200 [μm] se utiliza la función del ajuste. Tomando como ejemplo la Figura 50, se posee la siguiente fórmula:

$$Tiempo = 555,31 * Diámetro^{-0,694}$$

$$Tiempo = 555,31 * 200^{-0,694}$$

$$Tiempo = 14,04 [min]$$

Desarrollando de igual manera para las otras curvas, se llega a la siguiente propuesta de tiempos de molienda:

Tabla 38 Tiempos propuestos de molienda

UG	Tiempo [min:seg]
M1	15:01
M2	14:46
M3	14:02

Luego de conversar con la contraparte, se define como criterio que existe una alta variabilidad entre experimentos, provocando que se trabaje con valores aproximados para poder estandarizar más fácilmente si se desean replicar los experimentos, provocando que los tiempos finales sean:

Tabla 39 Tiempos de molienda por UG

UG	Tiempo [min:seg]
M1	15:00
M2	14:50
M3	14:00

8.3 Anexo Preparación de agua

En la elaboración de agua de mar desalinizada sintética se poseen los principales iones disueltos junto a su respectiva concentración:

Tabla 40 Principales elementos presentes en agua de mar desalinizada

Elemento	Unidad de medida	Concetración
Chloride	mg/L	458
Sulphate	mg/L	2.750
Calcium	mg/L	578
Magnesium	mg/L	75
Potassium	mg/L	48
Sodium	mg/L	784
pH	s.u.	8,0
TDS	mg/L	4.699

Además, existe una lista de las sales recomendadas a utilizar, con el fin de poder replicar el experimento en otros laboratorios. Estas son:

Tabla 41 Sales disponibles para experimentos

Sal
NaCl
KCl
MgCl ₂
CaCl ₂
Na ₂ SO ₄
K ₂ SO ₄
MgSO ₄
CaSO ₄

Considerando los pesos molares de cada uno de los iones presentes [58], se encuentra la composiciones de sales que optimiza el cumplimiento de las concentraciones deseadas. Se utiliza la herramienta “Solver” de Excel para encontrar los valores, llegando a las siguientes concentraciones considerando que se trabaja con agua purificada:

Tabla 42 Concentraciones preliminares elaboración de agua

Elemento	Cantidad [mg/L]
NaCl	0
KCl	93,47245074
MgCl ₂	288,635093
CaCl ₂	315,9
Na ₂ SO ₄	2423,0
K ₂ SO ₄	0,0
MgSO ₄	0,0
CaSO ₄	1575,9

Sin embargo, algunas sales vienen hidratadas como se presenta a continuación:

Tabla 43 Sales disponibles

Compuesto	Compuesto disponible
NaCl	-
KCl	KCl
MgCl₂	MgCl ₂ *6H ₂ O
CaCl₂	CaCl ₂ *2H ₂ O
Na₂SO₄	Na ₂ SO ₄
K₂SO₄	-
MgSO₄	-
CaSO₄	CaSO ₄ *2H ₂ O

De esa forma, se llega a la siguiente receta considerando la concentración y la cantidad necesarias para dos litros, los utilizados en experimentos:

Tabla 44 Receta elaboración agua de mar desalinizada sintética

Compuesto	Verter [mg/L]	Para 2L [mg]
NaCl	0,0	0,0
KCl	93,5	186,9
MgCl₂	616,2	1232,4
CaCl₂	418,4	836,8
Na₂SO₄	2423,0	4846,0
K₂SO₄	0,0	0,0
MgSO₄	0,0	0,0
CaSO₄	1992,6	3985,2

Considerando la fórmula elaborada por Lyman y Fleming para agua de mar desalinizada [44], se debe disolver por separado las sales gravimétricas y las sales volumétricas. Esto quiere decir, las sales hidratadas deben disolverse por separado a las sales no hidratadas. Haciendo que en la elaboración del agua conlleve dos etapas: La de mezclar por separado y luego unir las dos mezclas y regular pH burbujeando aire.

8.4 Anexo Elaboración de curvas de consumo de cal

8.4.1 Elaboración de curvas de consumo de cal: Metodología

En la elaboración de curvas de consumo de cal se debe separar en dos métodos distintos. Por un lado, están las curvas mediante el método tradicional y, por otro lado, las curvas mediante el molino Magotteaux:

8.4.1.1 Elaboración de curvas método tradicional

1. Moler una muestra durante el tiempo determinado para llegar al P80 de operación
2. Llevar producto al agitador
3. Agregar cal disuelta en agua purificada a concentración 20 [g/l]
4. Registrar cal agregada para llegar al pH deseado considerando que se registra en g de cal dividido en kg de mineral.
5. Repetir experimento con otros medios de molienda

8.4.2 Elaboración de curvas mediante molino Magotteaux

1. Preparar solución de cal disuelta en agua purificada a concentración 20 [g/l]
2. Determinar pH a trabajar
3. Moler durante el tiempo determinado para llegar al P80 de operación controlando:
 - a. pH constante durante la molienda agregando cal
 - b. Cantidad de cal agregada durante el tiempo
4. Registrar consumo de cal para mantener el pH electo
5. Repetir experimento con otros pH
6. Repetir experimento con otros medios de molienda

El consumo de cal a través del tiempo es medido con una balanza, haciendo necesario traspasar la medición en gramos a mililitros a partir de la densidad medida en un comienzo.

8.4.3 Elaboración de curvas de consumo de cal: Resultados

8.4.3.1 Consumo de cal a través del tiempo

En cada uno de los experimentos se registra el consumo de cal en el tiempo con un intervalo de un minuto. La medición es en masa, debido que se registra el peso de la solución de cal en el tiempo. Se presenta a continuación un ejemplo de medición en M1 manteniendo pH a 9,5:

Tabla 45 Medición peso solución de cal en el tiempo M1 pH 9,5 v1

Tiempo [s]	Peso [g]
0	502,7
60	501,5
120	500
180	499,5
240	498,4
300	497,9
360	498
420	490,7
480	488,6
540	486,2
600	485,9
660	485,9
720	485,7
780	485,4
840	485
900	483,6

Debido a que la medición es en peso, se es necesario traspasar la medición a litros presentes. Esto se realiza considerando que el volumen inicial es 0,5 litros y que se consume uniformemente con las siguientes ecuaciones:

Ecuación 5 Densidad de muestra

$$\rho = \frac{\text{Peso inicial}}{\text{Volumen inicial}}$$

Con

$$\rho = \text{Densidad de muestra}$$

Considerando la información de Tabla 45 se calcula:

$$\rho = \frac{0,5027 \text{ [kg]}}{0,5 \text{ [l]}} = 1,0054 \left[\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right]$$

Con el valor de la densidad se puede calcular el volumen de la solución en el tiempo transformando:

$$Volumen = \frac{Masa}{\rho}$$

En el caso del segundo punto de Tabla 45:

$$Volumen = \frac{0,5015 [kg]}{1,0054 \left[\frac{kg}{l} \right]} = 0,498 [l]$$

Luego, el consumo en el tiempo se calcula restando el volumen en el tiempo al volumen inicial:

$$Consumo solución = Volumen inicial - Volumen medido$$

Siendo para el mismo punto calculado:

$$Consumo solución = 0,5 [l] - 0,498 [l] = 0,002 [l]$$

Después, se puede calcular el consumo de cal sabiendo que la concentración de la solución es 20 [g/l]:

$$Consumo cal = Consumo solución * 20 \left[\frac{g}{l} \right]$$

Siguiendo el mismo caso que se está calculando sería:

$$Consumo cal = 0,002 [l] * 20 \left[\frac{g}{l} \right] = 0,04 [g]$$

Finalmente, se obtiene el consumo de cal por kilogramo de mineral. Procesando para todos los puntos de la Tabla 45 se obtiene el siguiente cuadro resumen:

Tabla 46 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 9,5 v1

Tiempo [s]	Peso [g]	Volumen [l]	Consumo solución [l]	Consumo de cal [g]	Consumo de cal [g/kg]
0	502,7	0,50	0,00	0,00	0,00
60	501,5	0,50	0,00	0,02	0,02
120	500,0	0,50	0,00	0,05	0,04
180	499,5	0,50	0,00	0,06	0,04
240	498,4	0,50	0,00	0,09	0,06
300	497,9	0,50	0,00	0,10	0,06
360	498,0	0,50	0,00	0,09	0,06
420	490,7	0,49	0,01	0,24	0,16
480	488,6	0,49	0,01	0,28	0,19
540	486,2	0,48	0,02	0,33	0,22
600	485,9	0,48	0,02	0,33	0,23
660	485,9	0,48	0,02	0,33	0,23
720	485,7	0,48	0,02	0,34	0,23
780	485,4	0,48	0,02	0,34	0,23
840	485,0	0,48	0,02	0,35	0,24
900	483,6	0,48	0,02	0,38	0,26

A continuación, se representa como una curva el consumo de cal en el tiempo para el caso analizado:

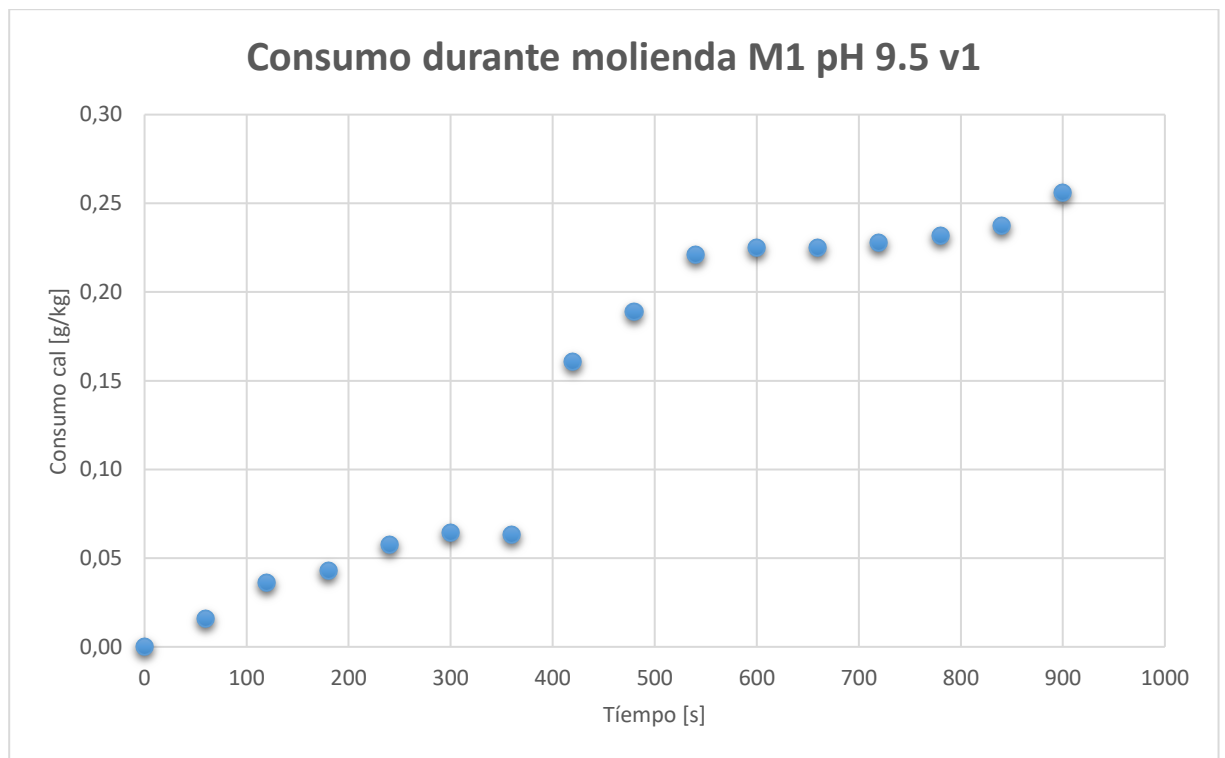


Figura 51 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 9,5 v1

Se desarrolla siguiendo la misma metodología para cada punto, llegando a los siguientes resultados:

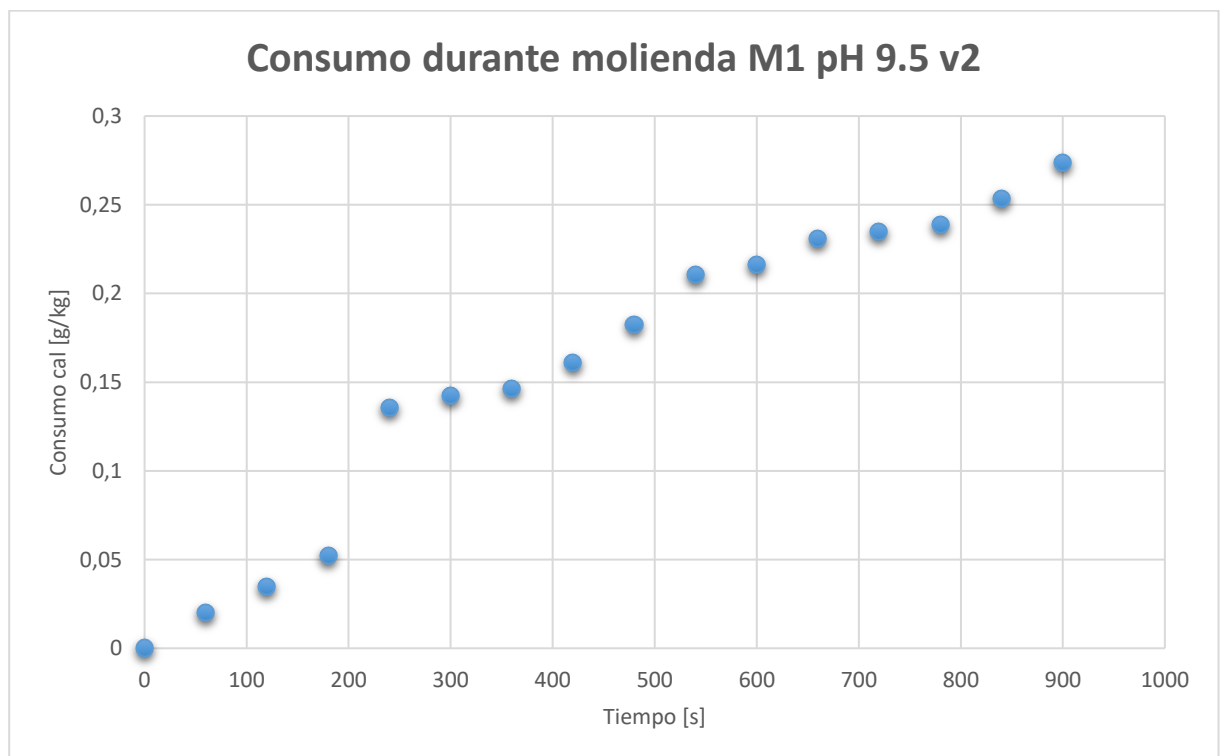


Figura 52 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 9,5 v2

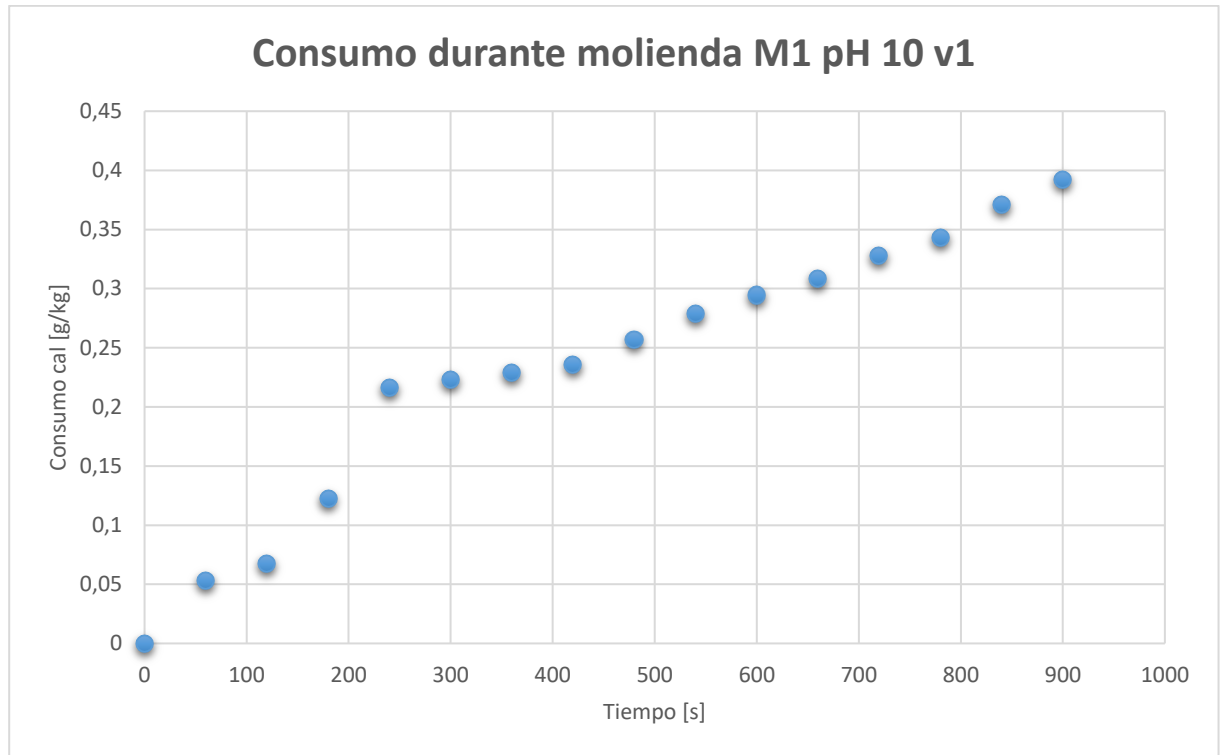


Figura 53 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 10 v1

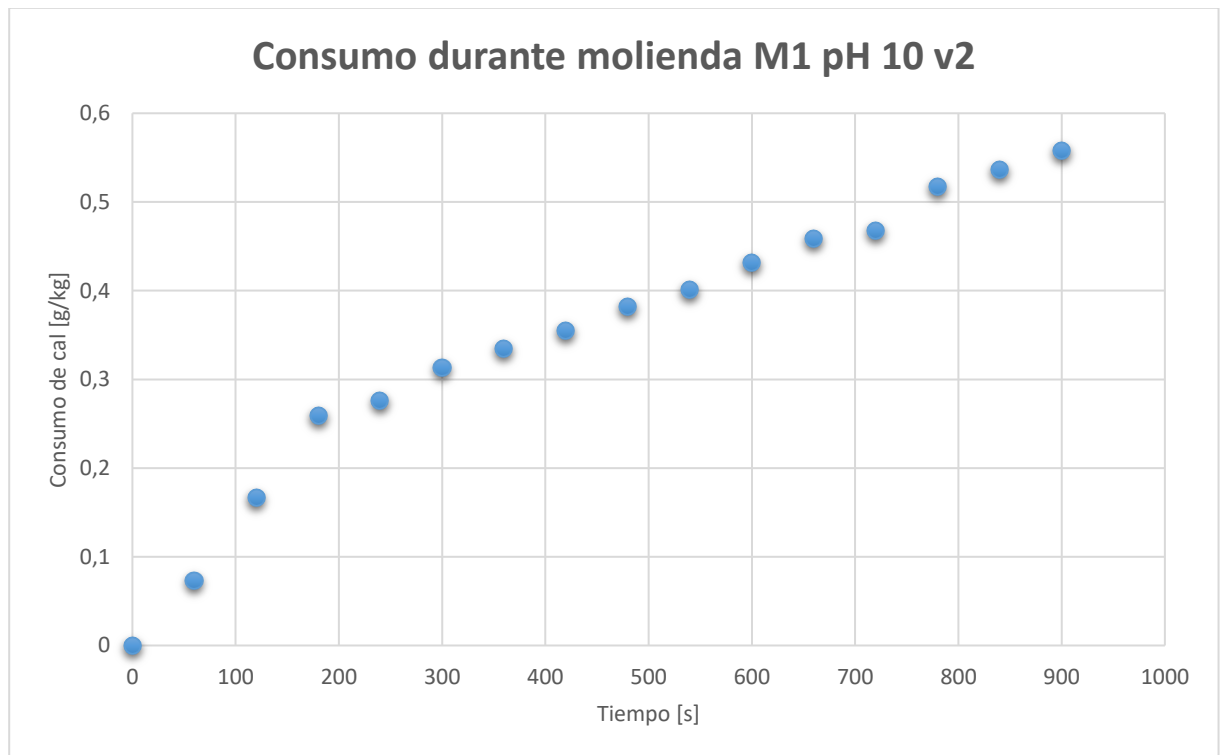


Figura 54 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 10 v2

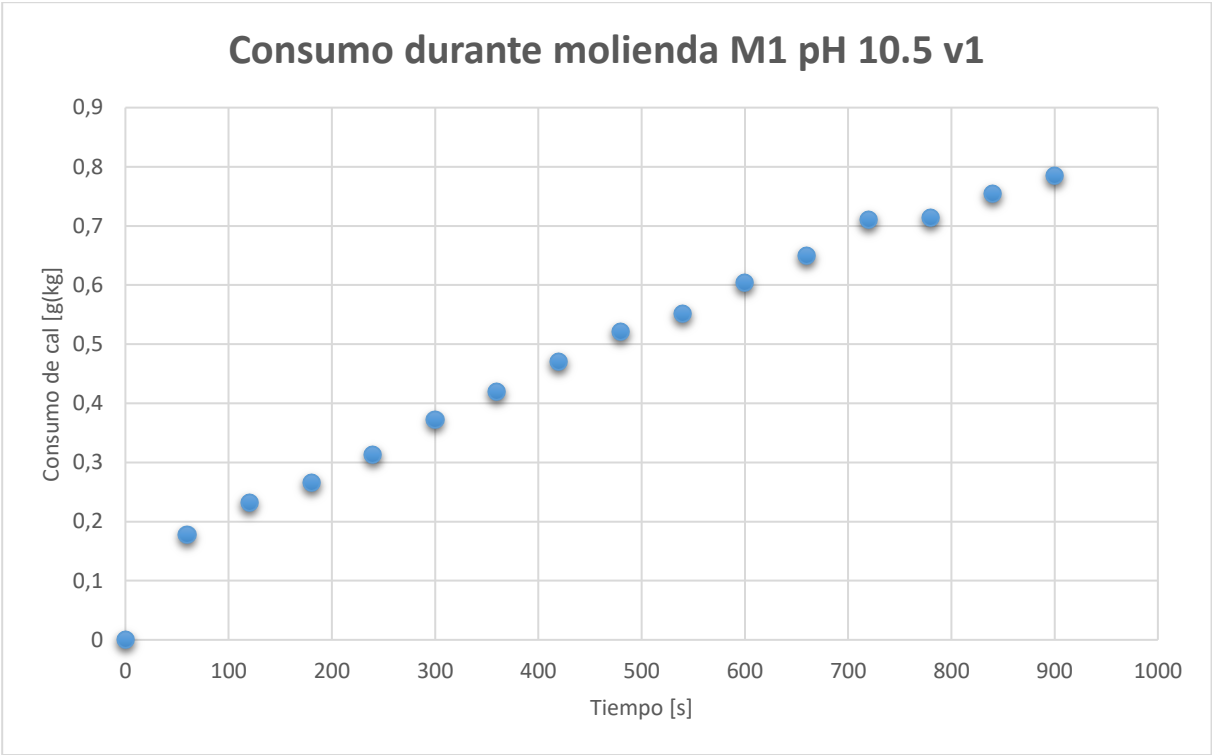


Figura 55 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 10,5 v1

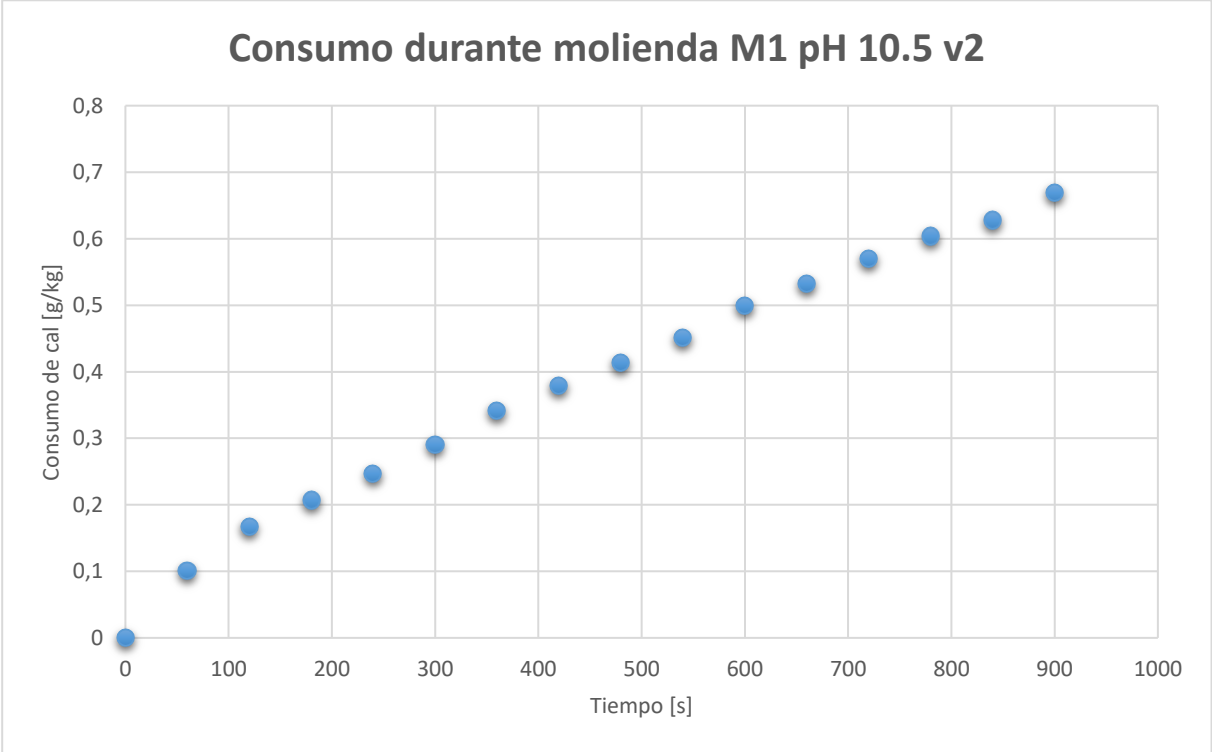


Figura 56 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 10,5 v2

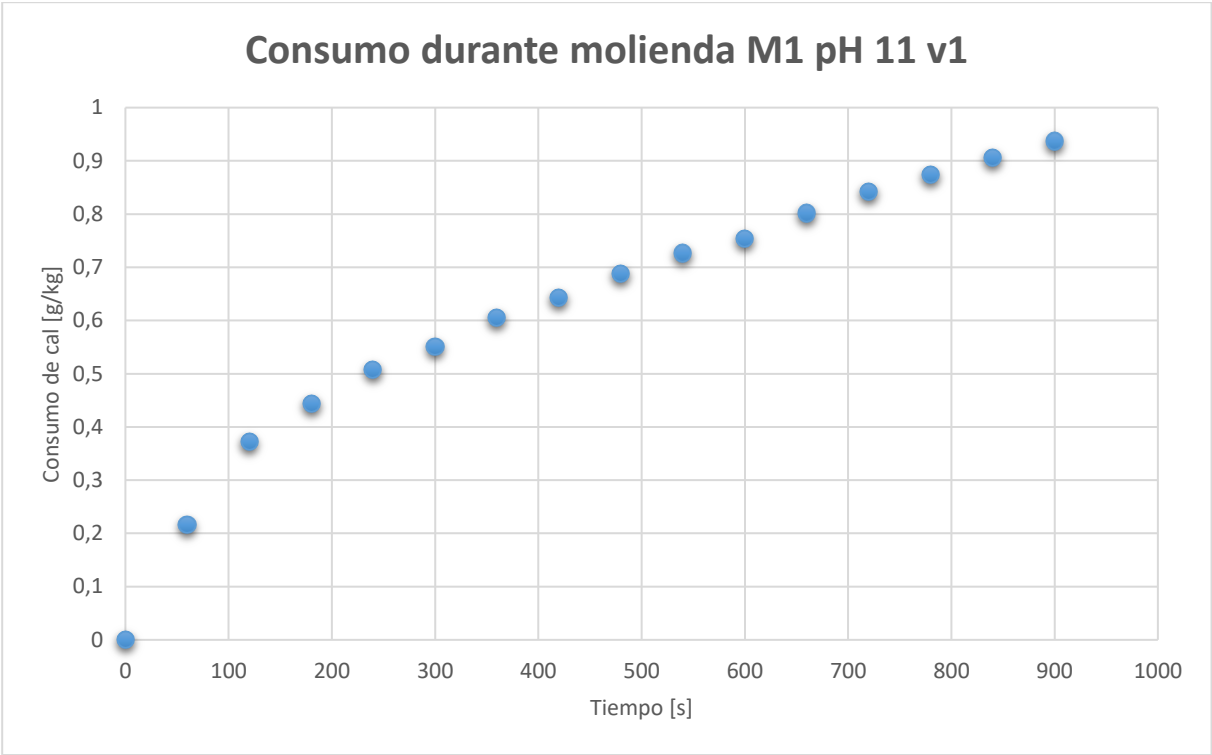


Figura 57 Consumo de cal durante el tiempo M1 pH 11 v1

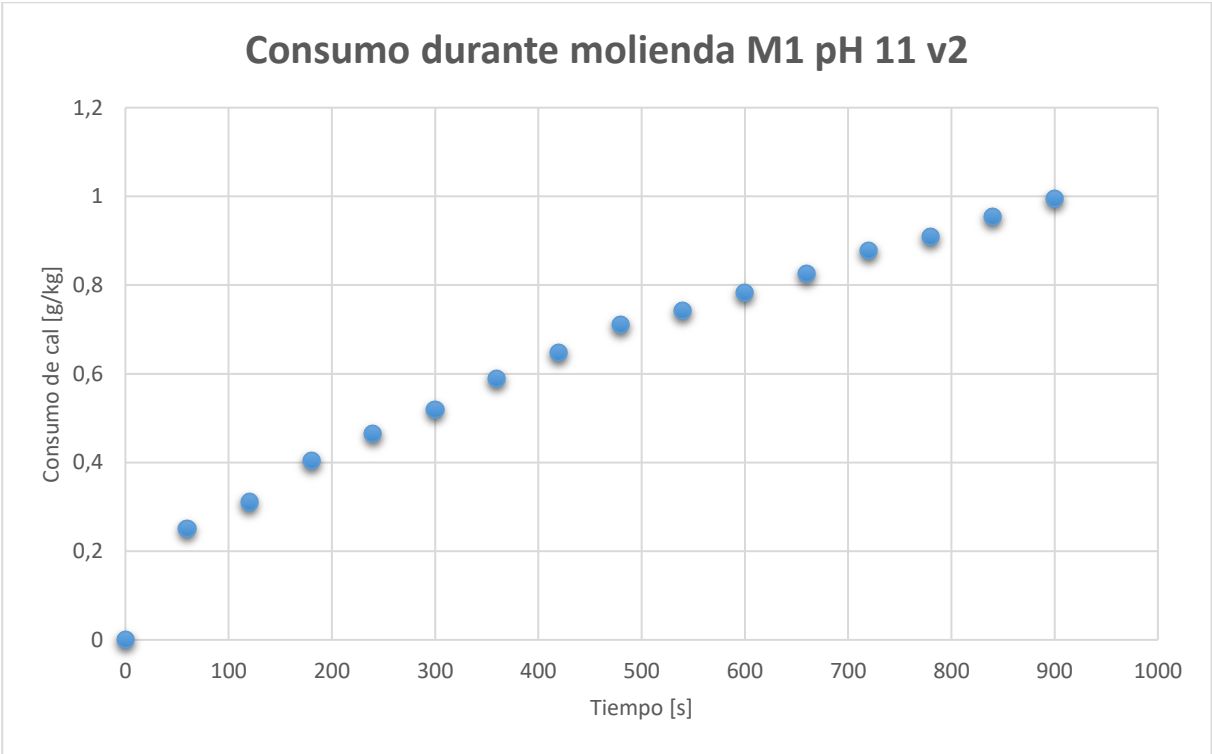


Figura 58 Consumo de cal en el tiempo M1 pH 11 v2

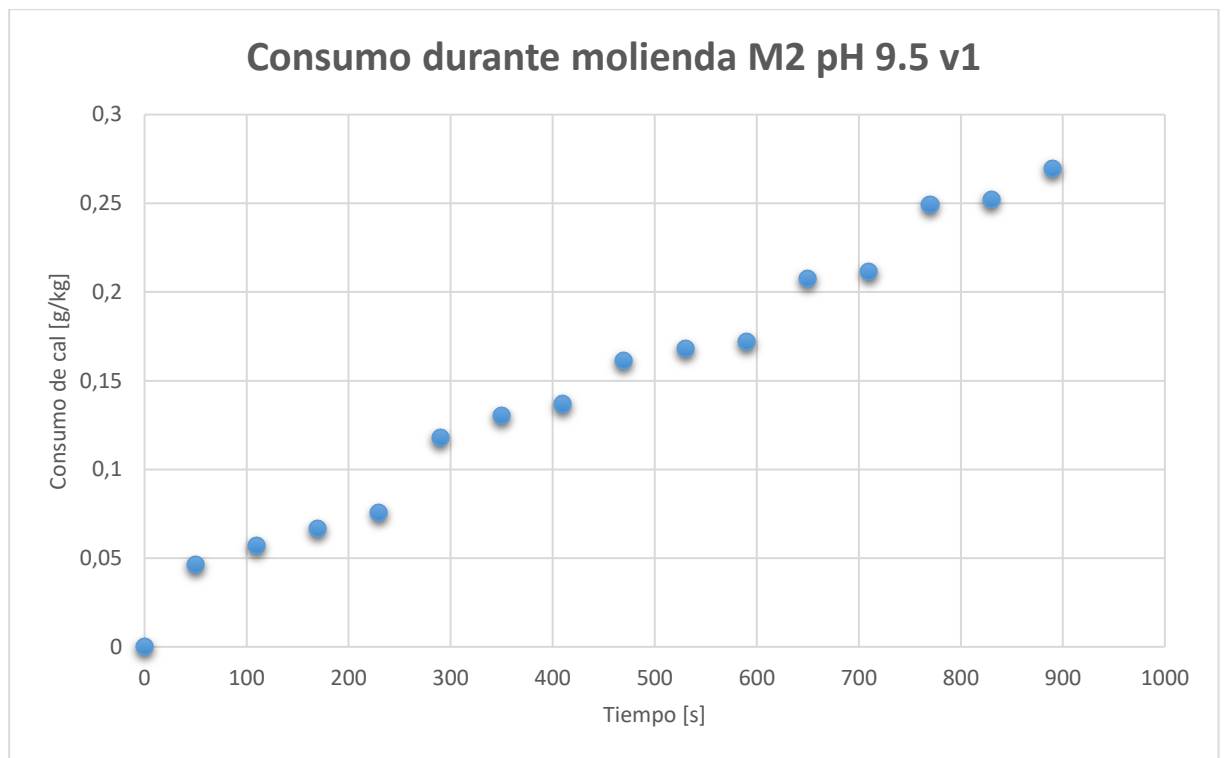


Figura 59 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 9,5 v1

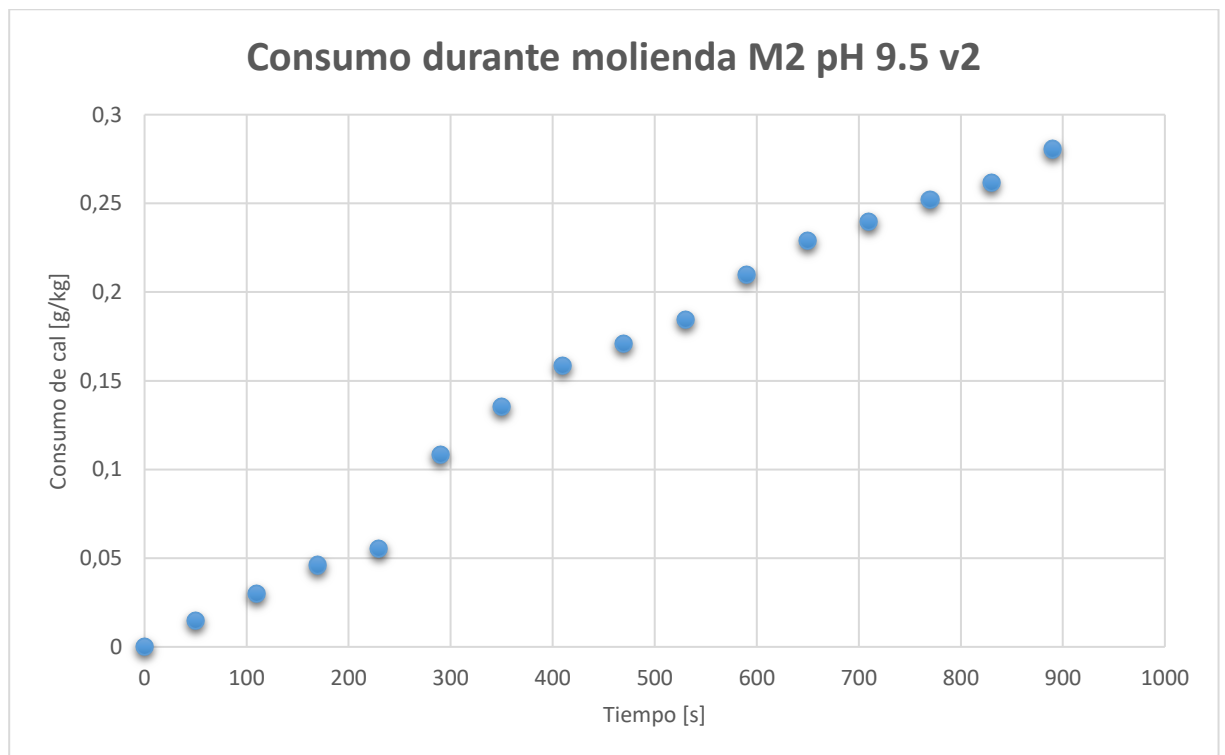


Figura 60 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 9,5 v2

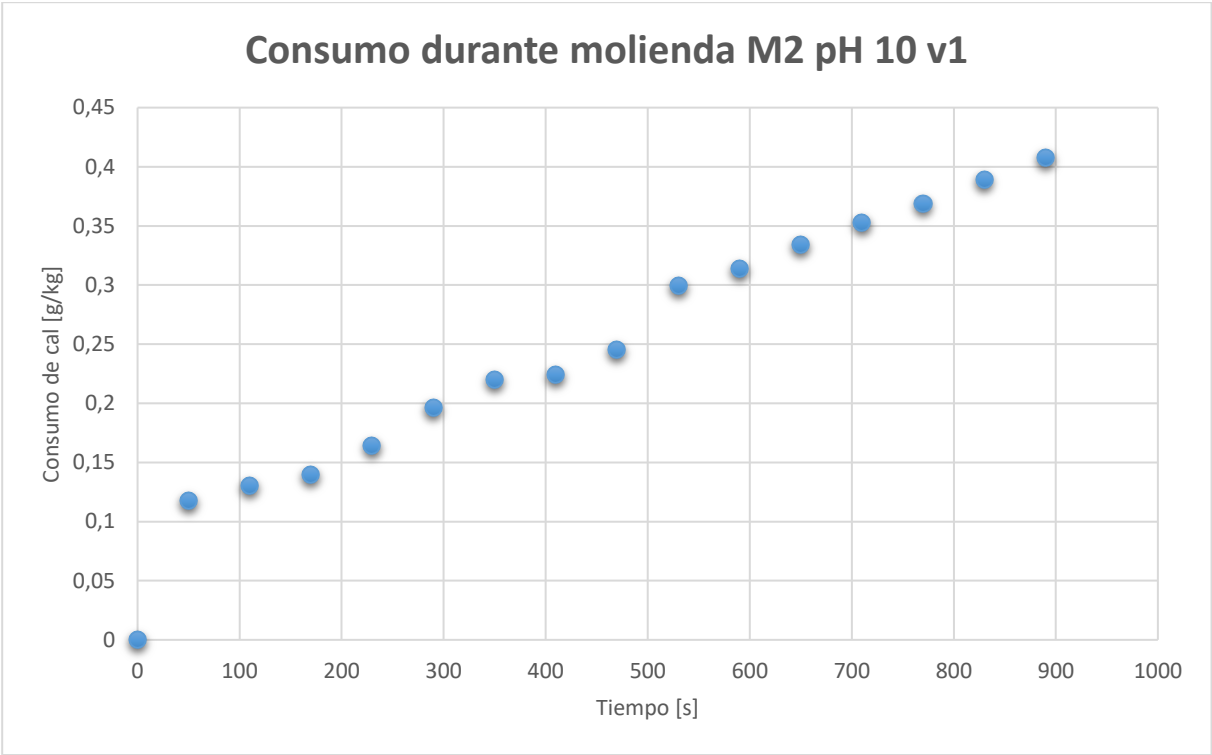


Figura 61 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 10 v1

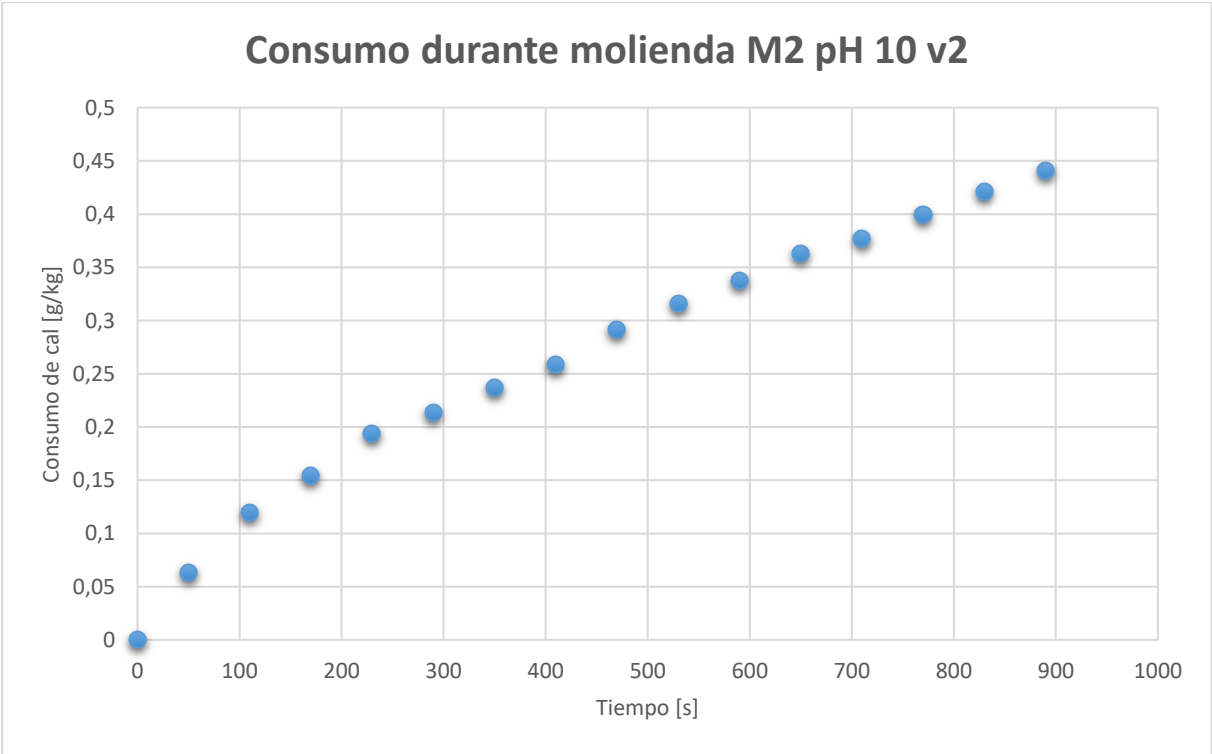


Figura 62 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 10 v2

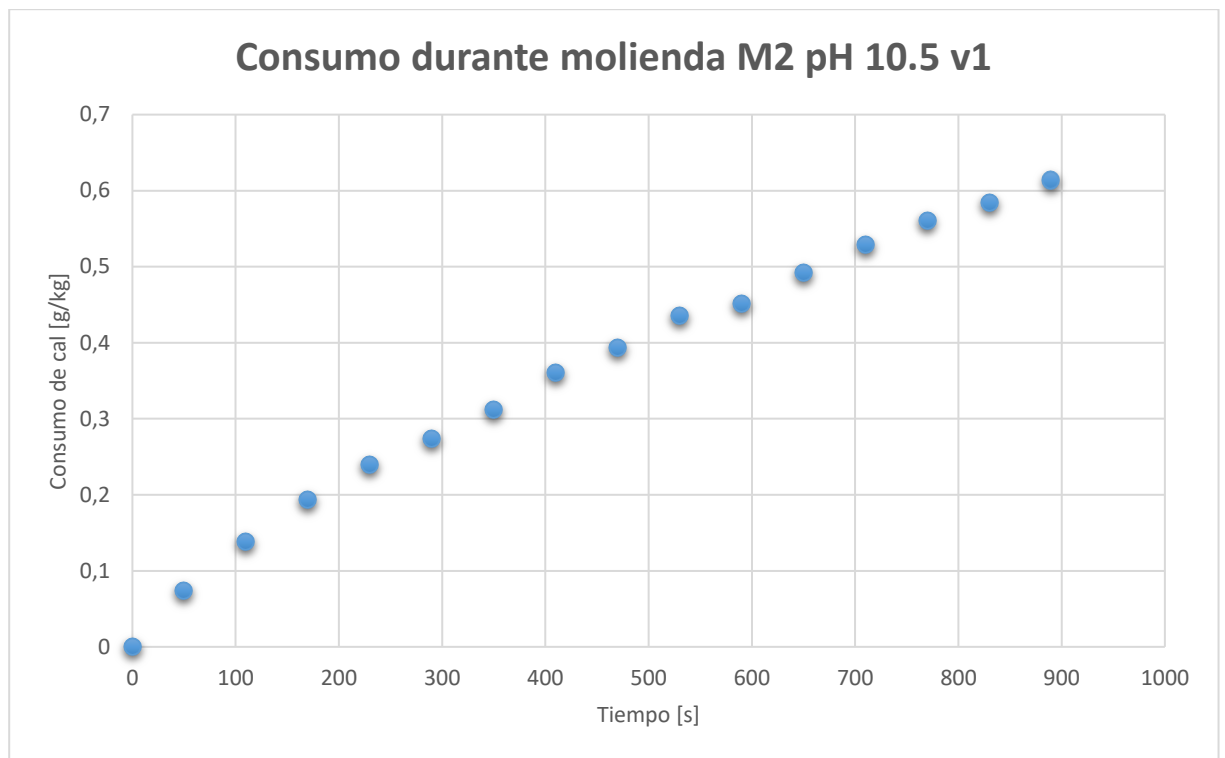


Figura 63 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 10,5 v1

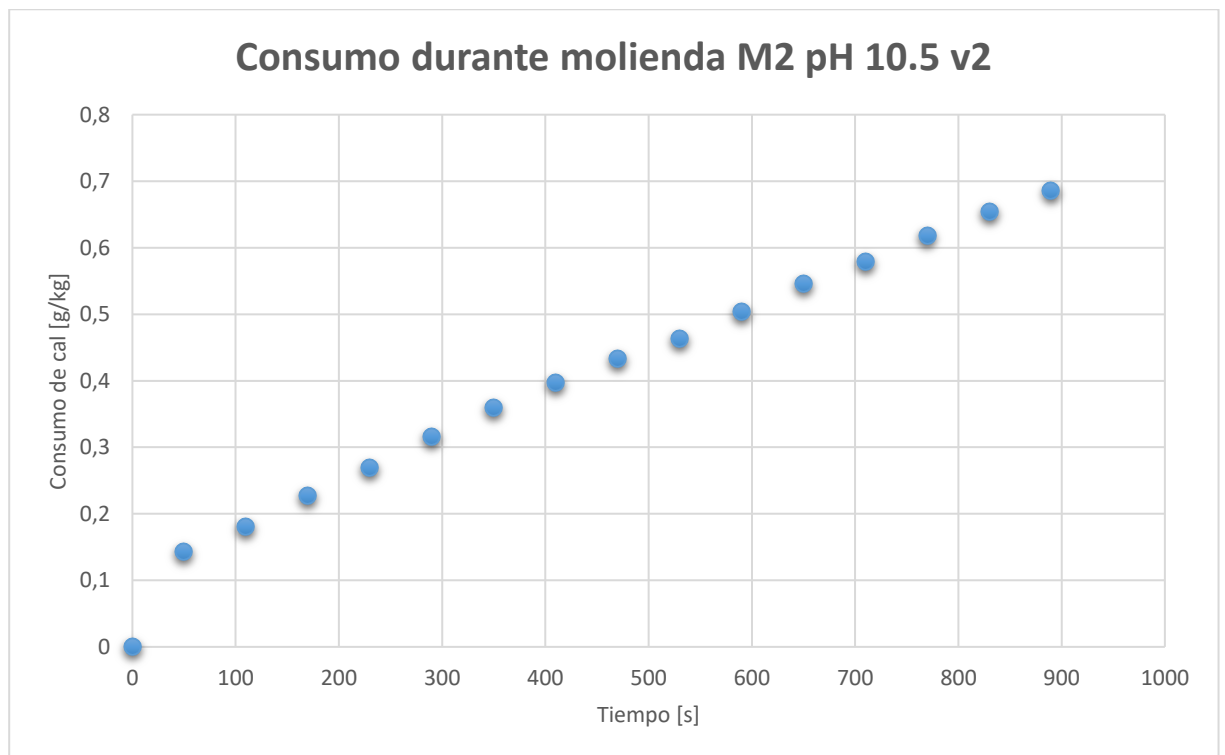


Figura 64 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 10,5 v2

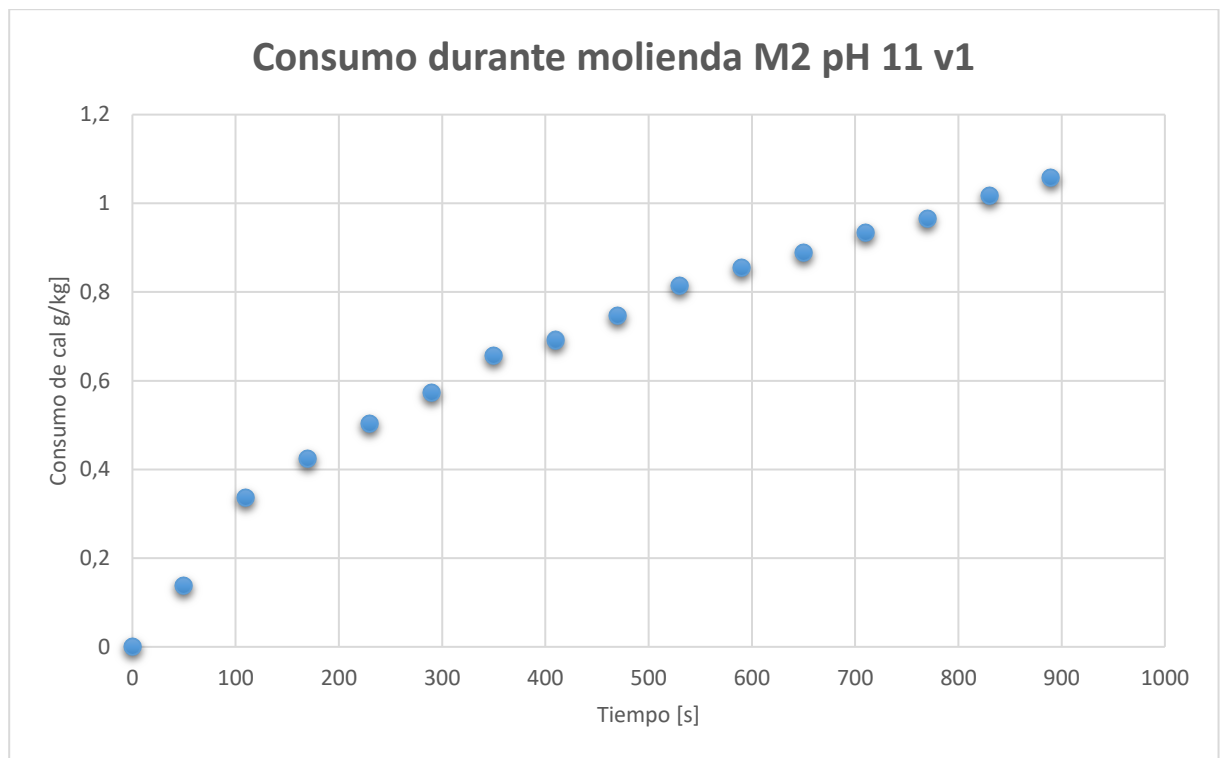


Figura 65 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 11 v1

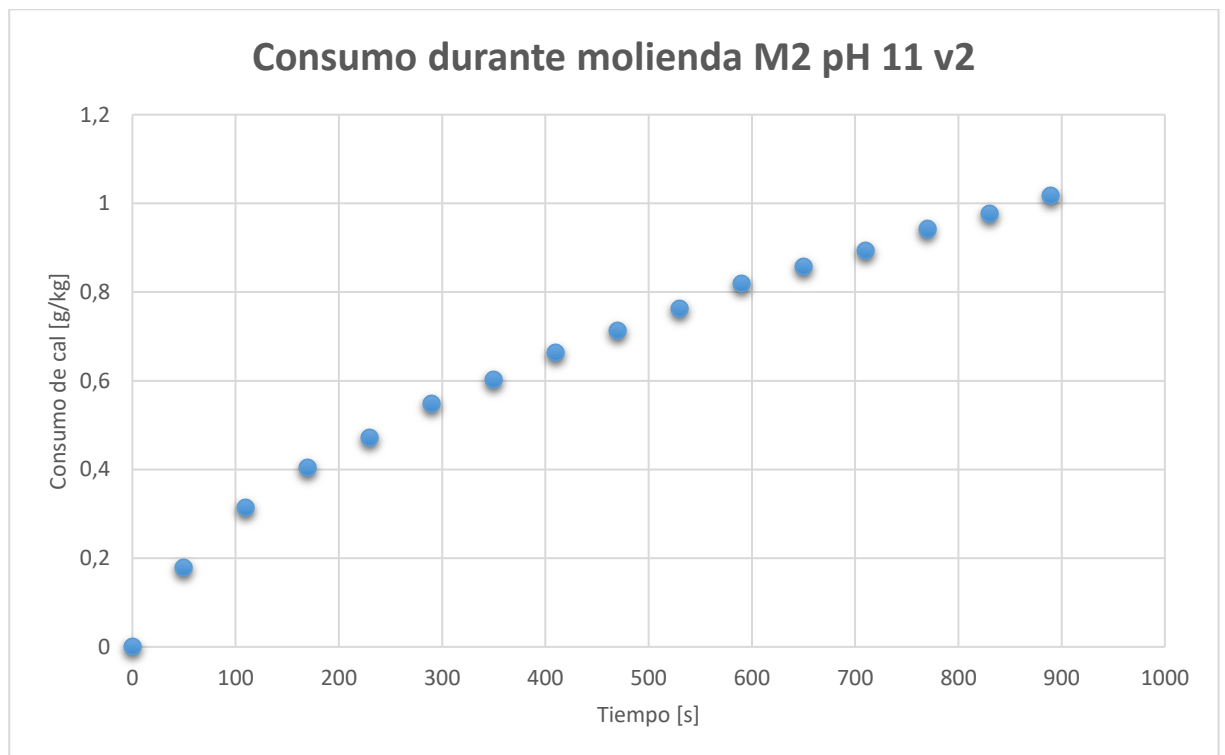


Figura 66 Consumo de cal en el tiempo M2 pH 11 v2

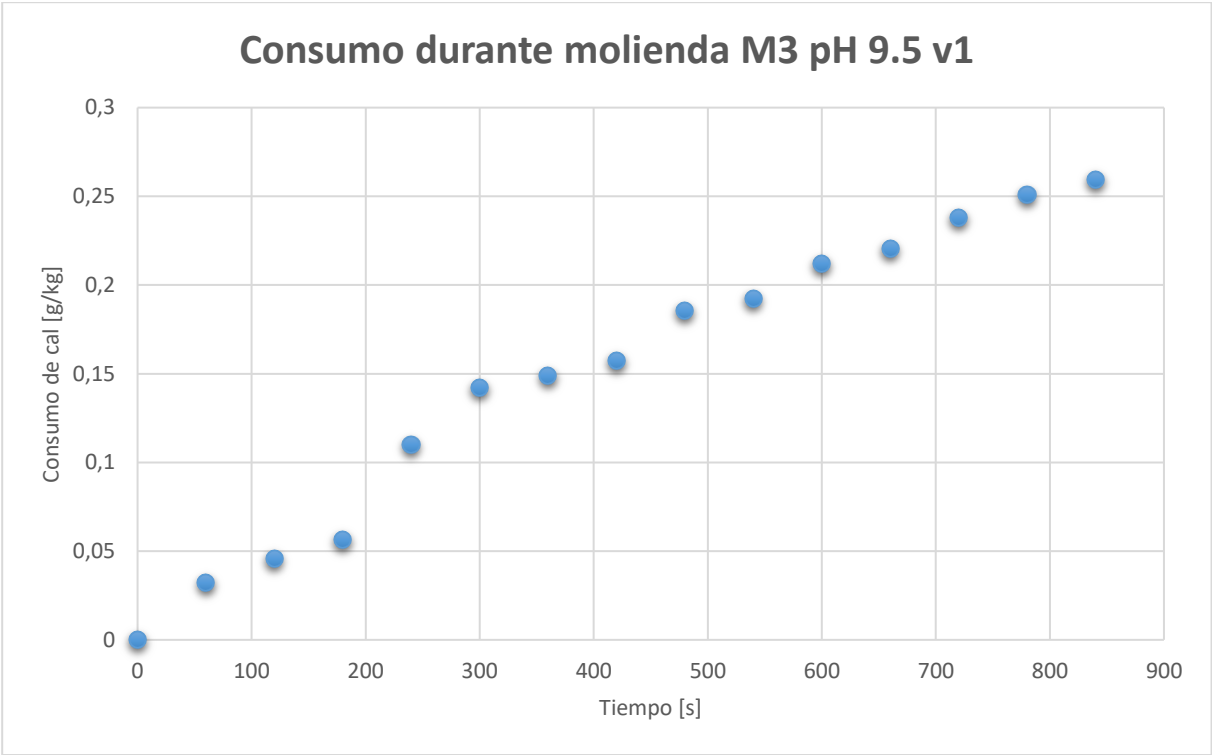


Figura 67 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 9,5 v1

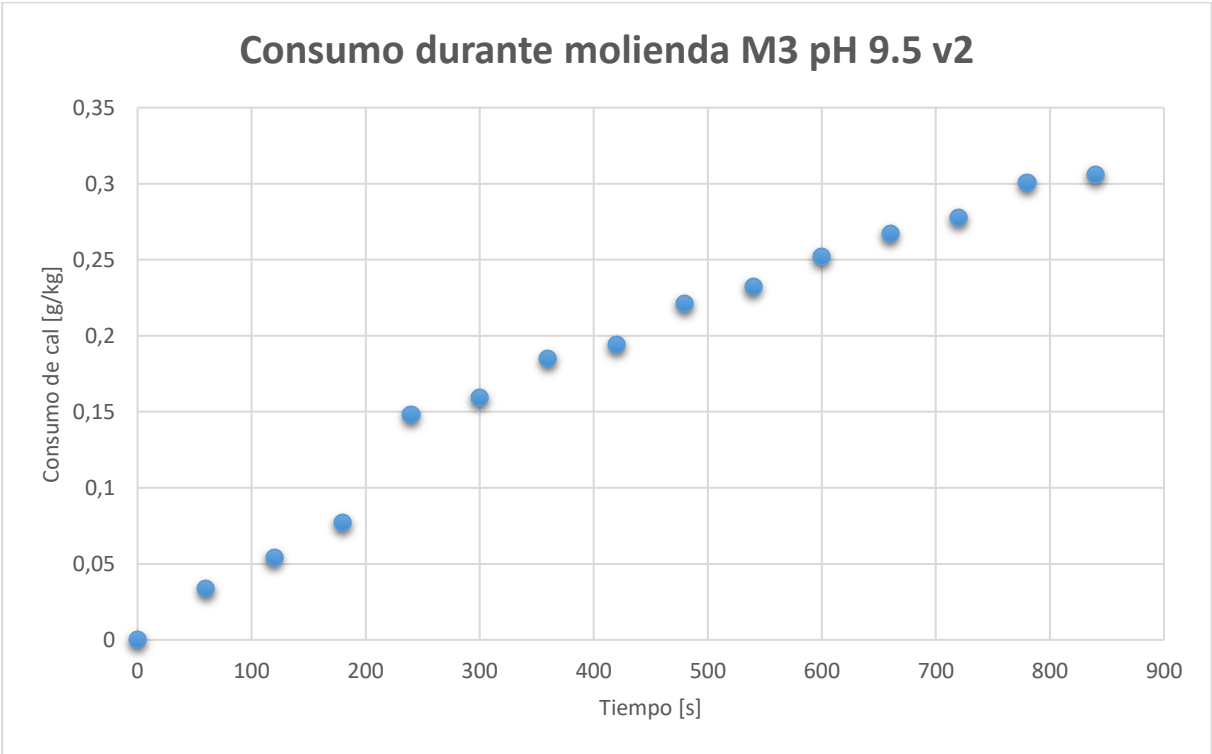


Figura 68 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 9,5 v2

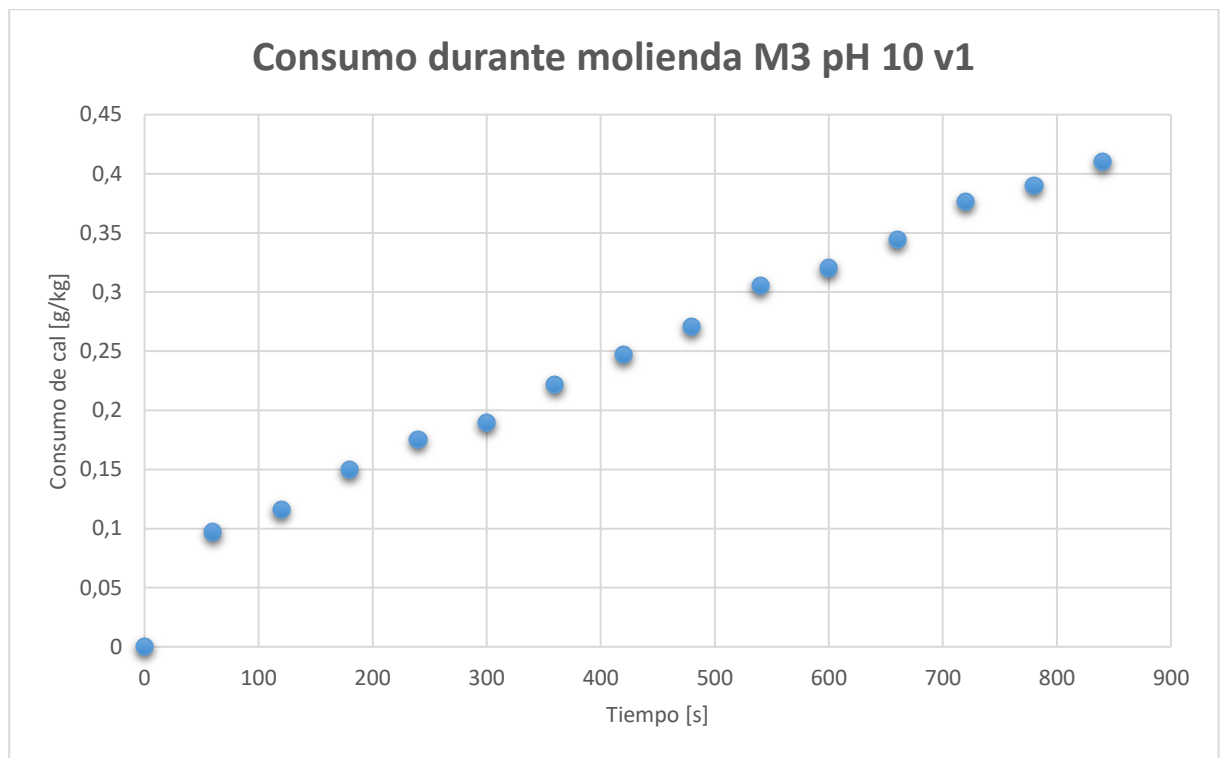


Figura 69 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 10 v1

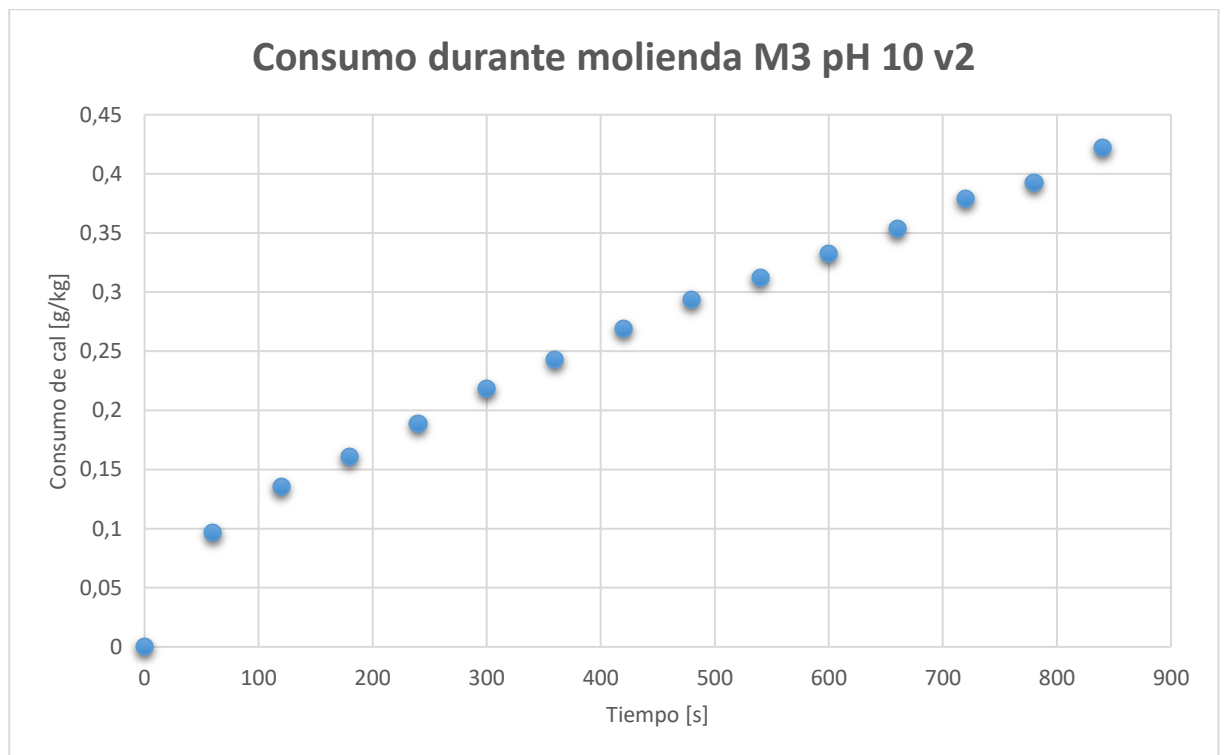


Figura 70 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 10 v2

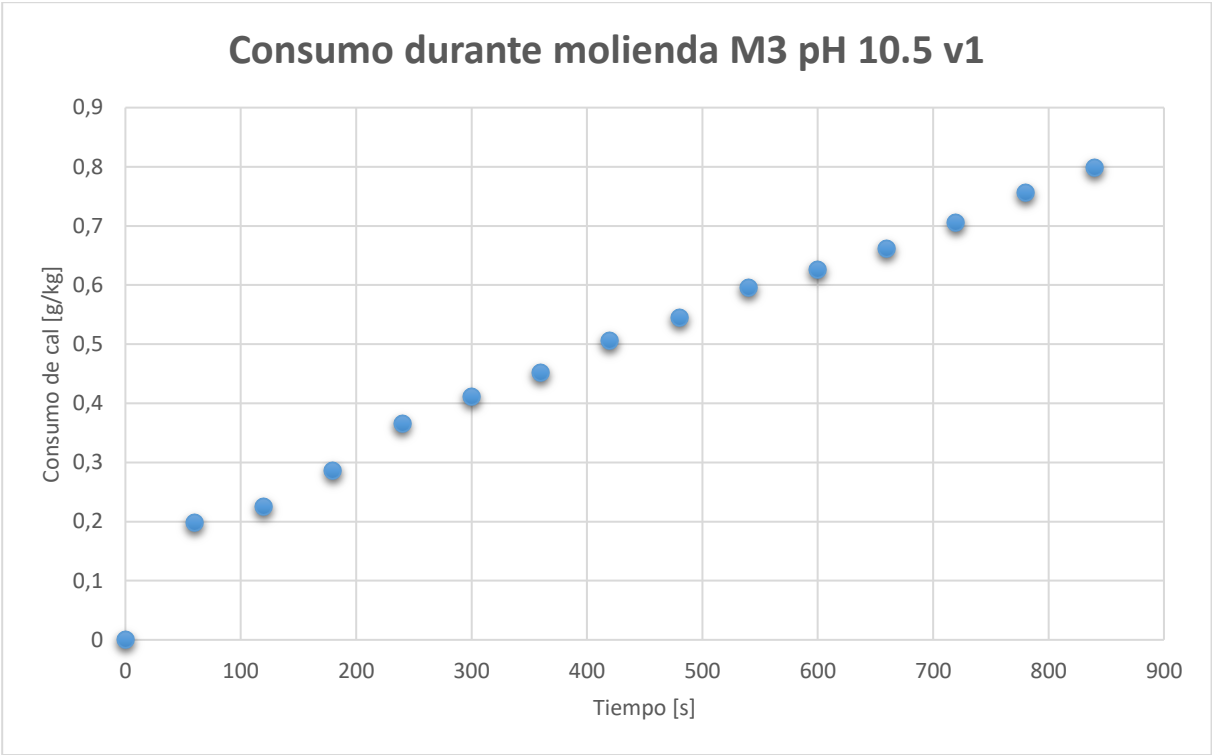


Figura 71 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 10,5 v1

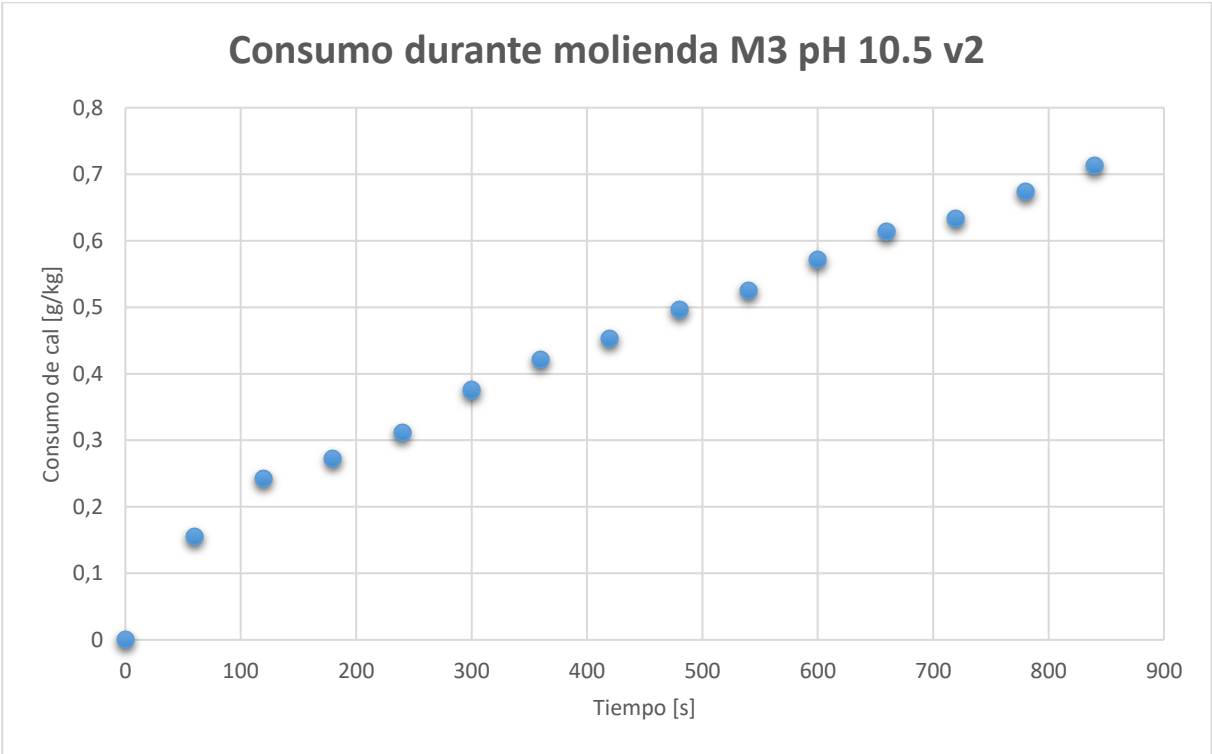


Figura 72 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 10,5 v2

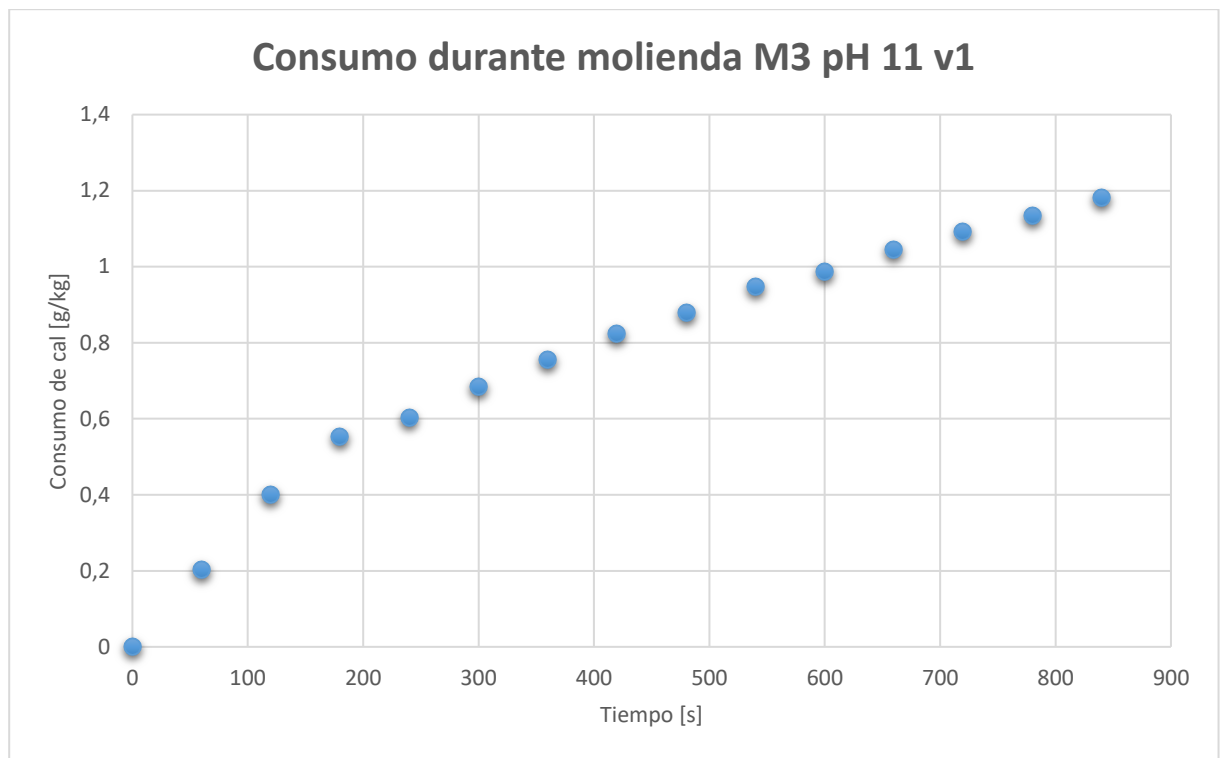


Figura 73 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 11 v1

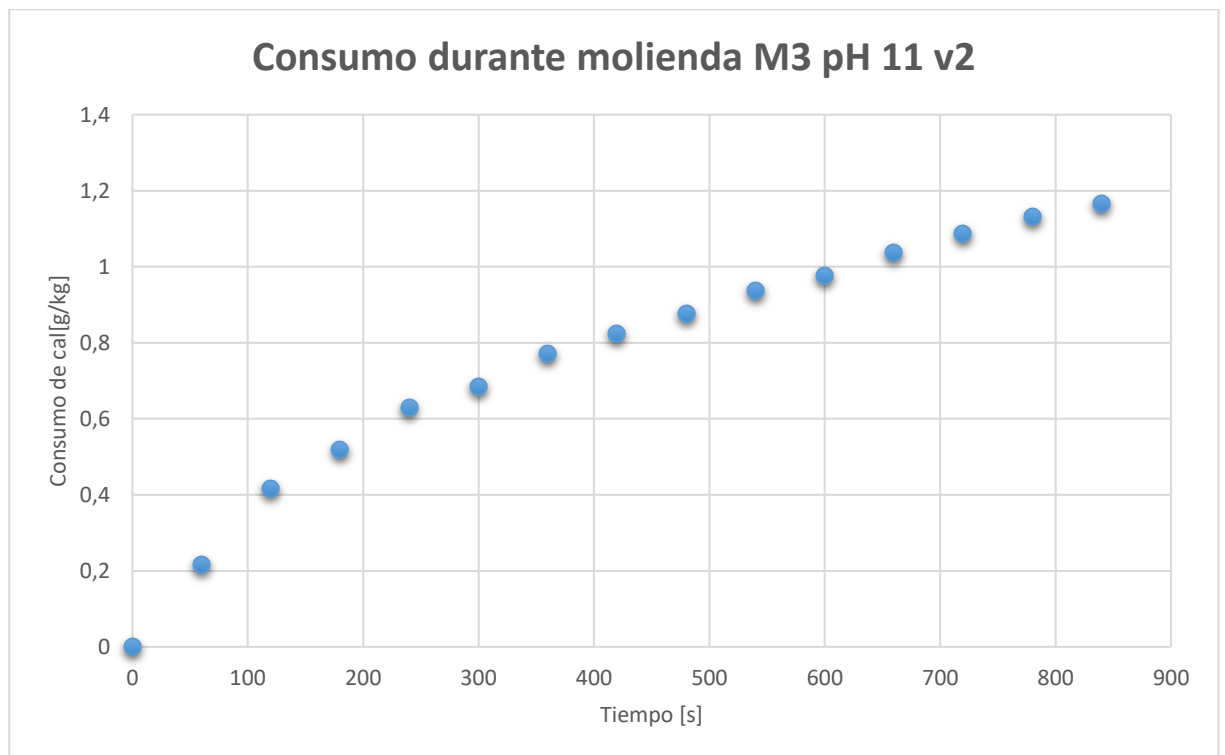


Figura 74 Consumo de cal en el tiempo M3 pH 11 v2

Además, se llegan a los siguientes resultados desarrollando con medios cromados:

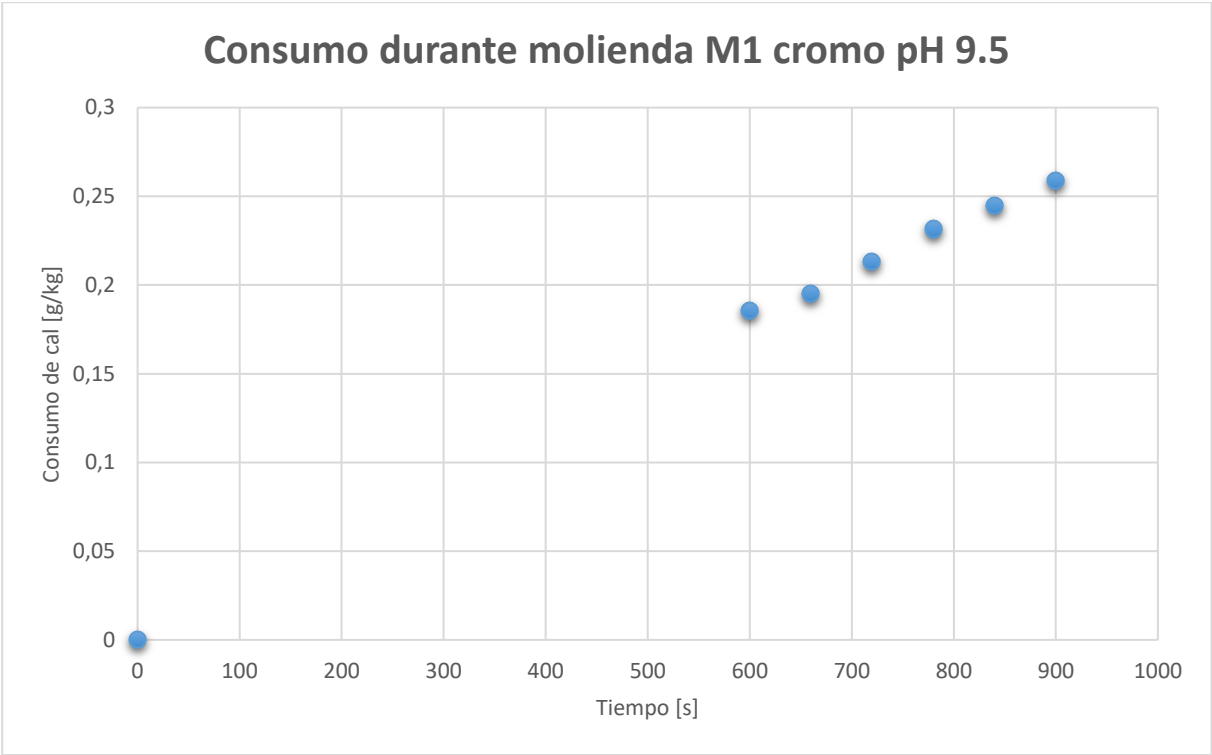


Figura 75 Consumo de cal en el tiempo M1 medios cromados pH 9,5

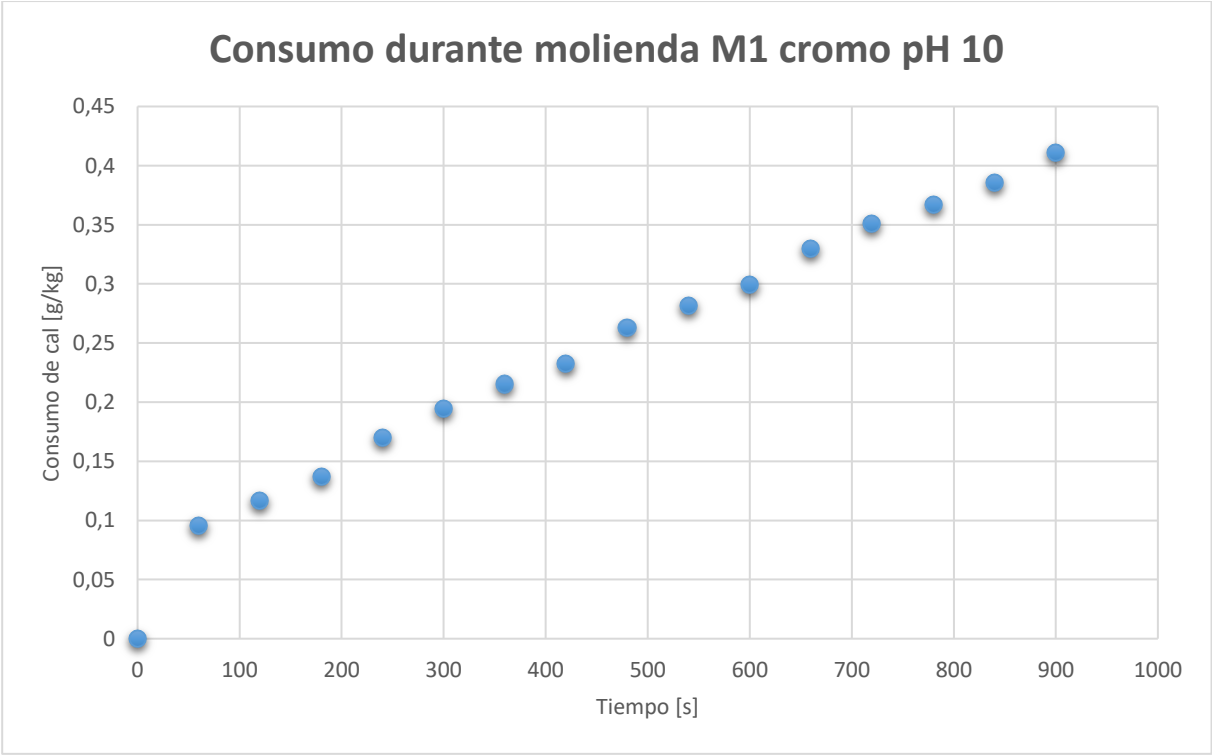


Figura 76 Consumo de cal en el tiempo M1 medios cromados pH 10

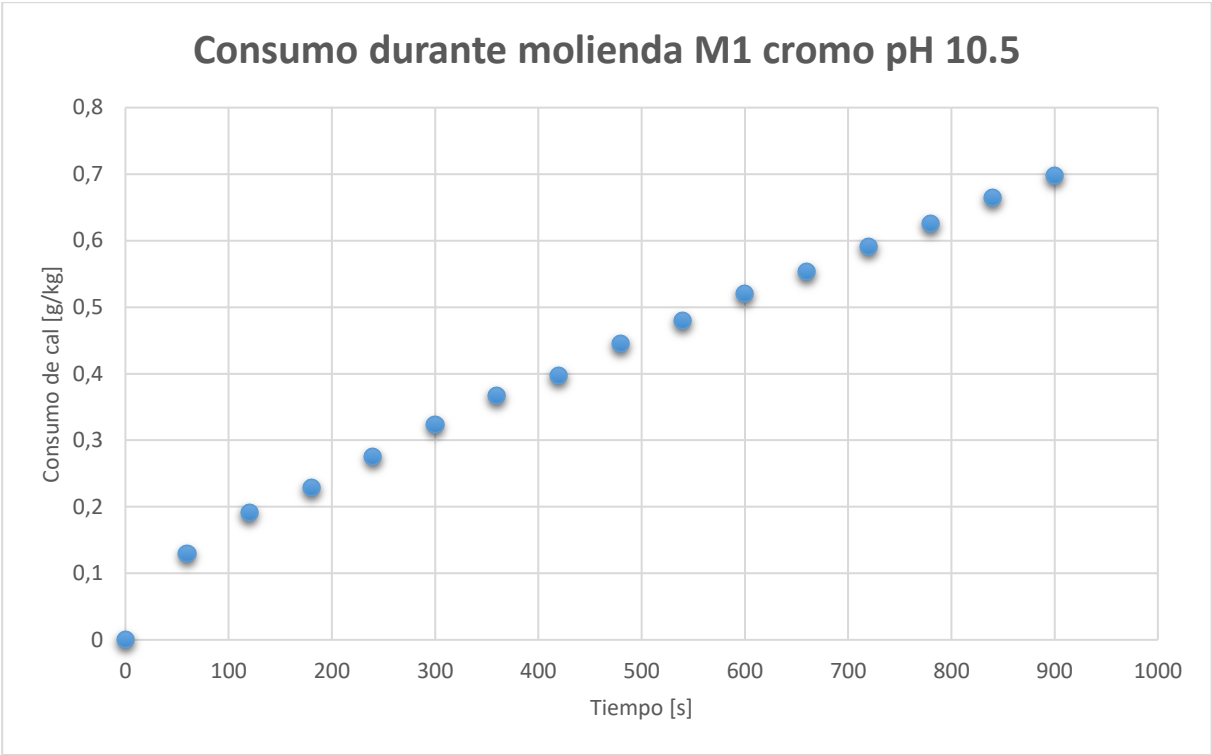


Figura 77 Consumo de cal en el tiempo M1 medios cromados pH 10,5

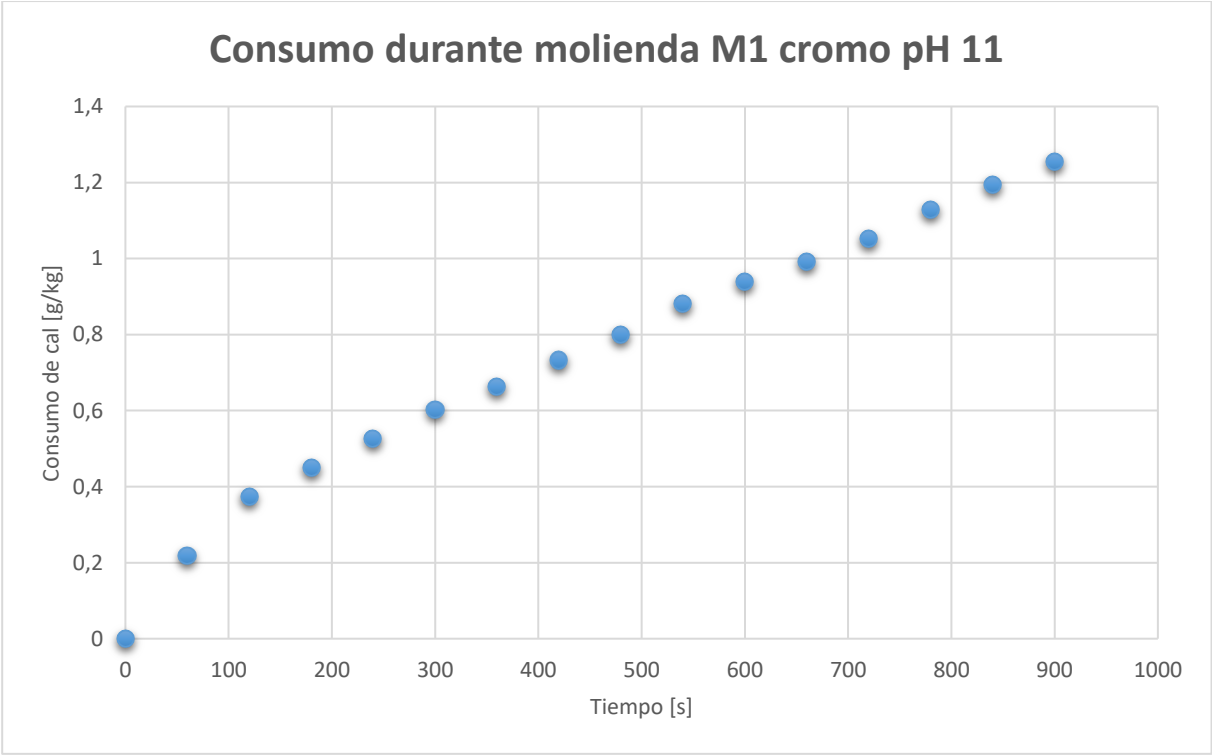


Figura 78 Consumo de cal en el tiempo M1 medios cromados pH 11

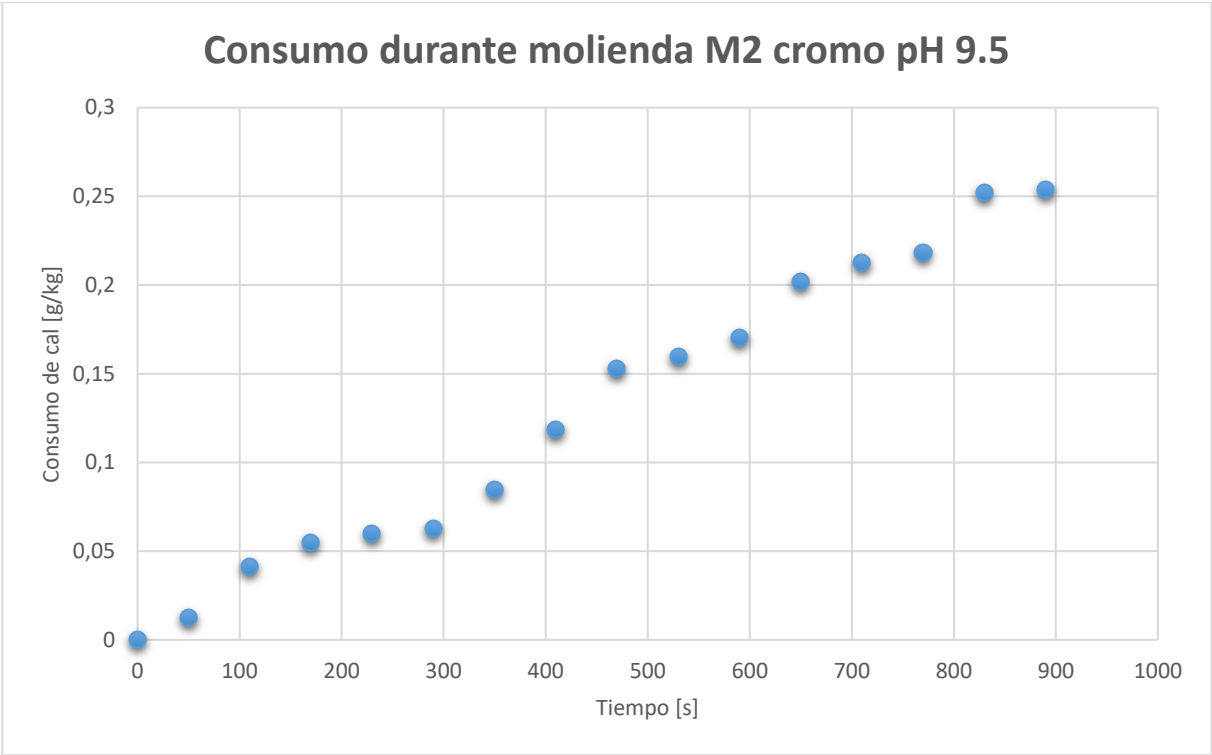


Figura 79 Consumo de cal en el tiempo M2 medios cromados pH 9,5

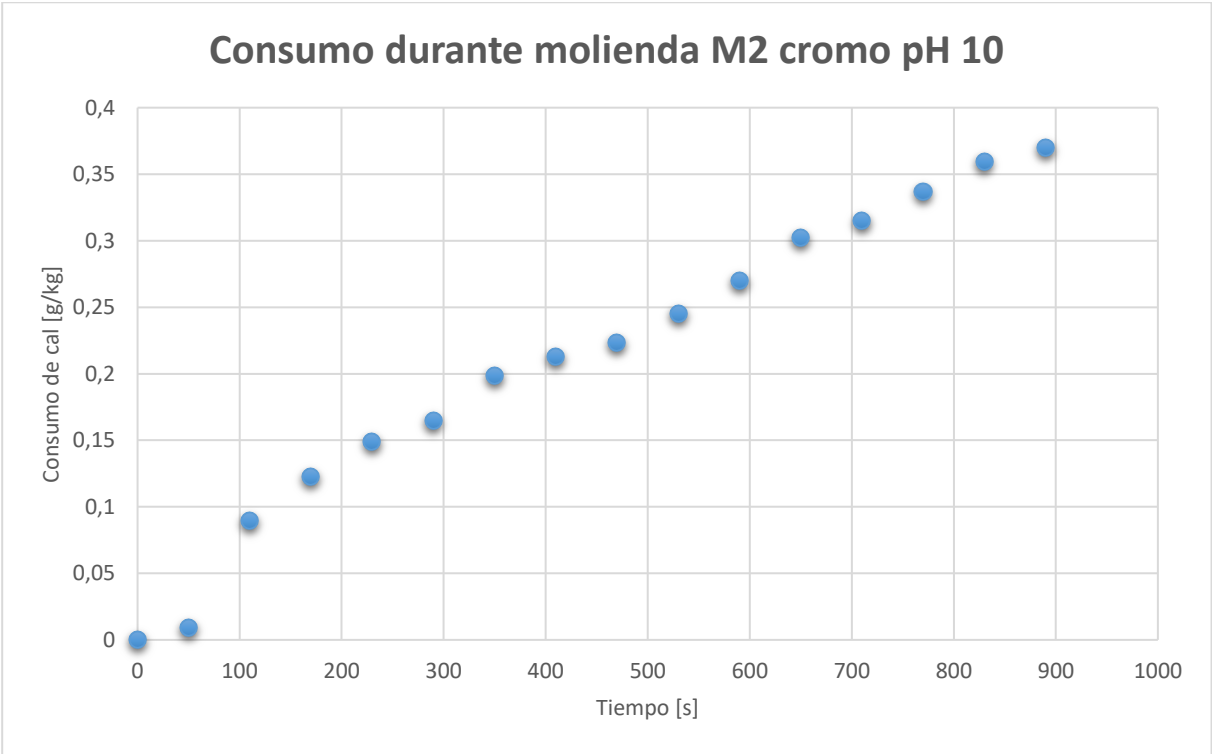


Figura 80 Consumo de cal en el tiempo M2 medios cromados pH 10

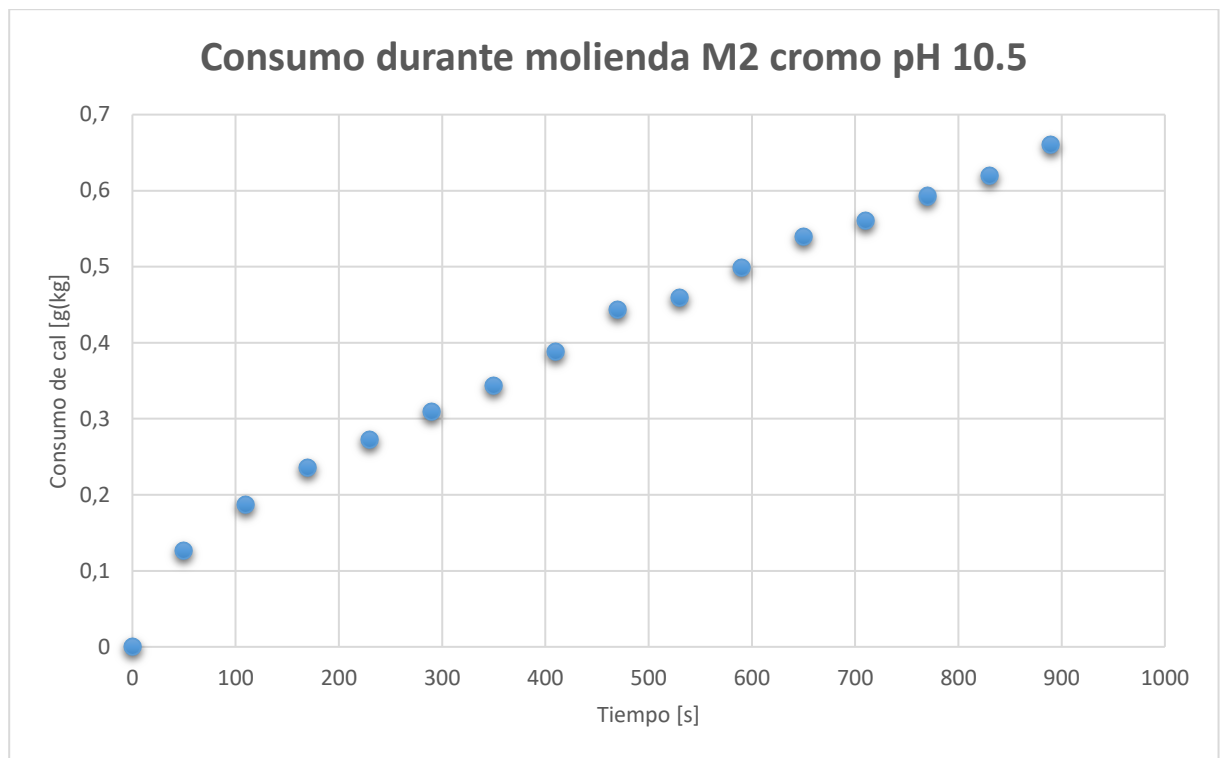


Figura 81 Consumo de cal en el tiempo M2 medios cromados pH 10,5

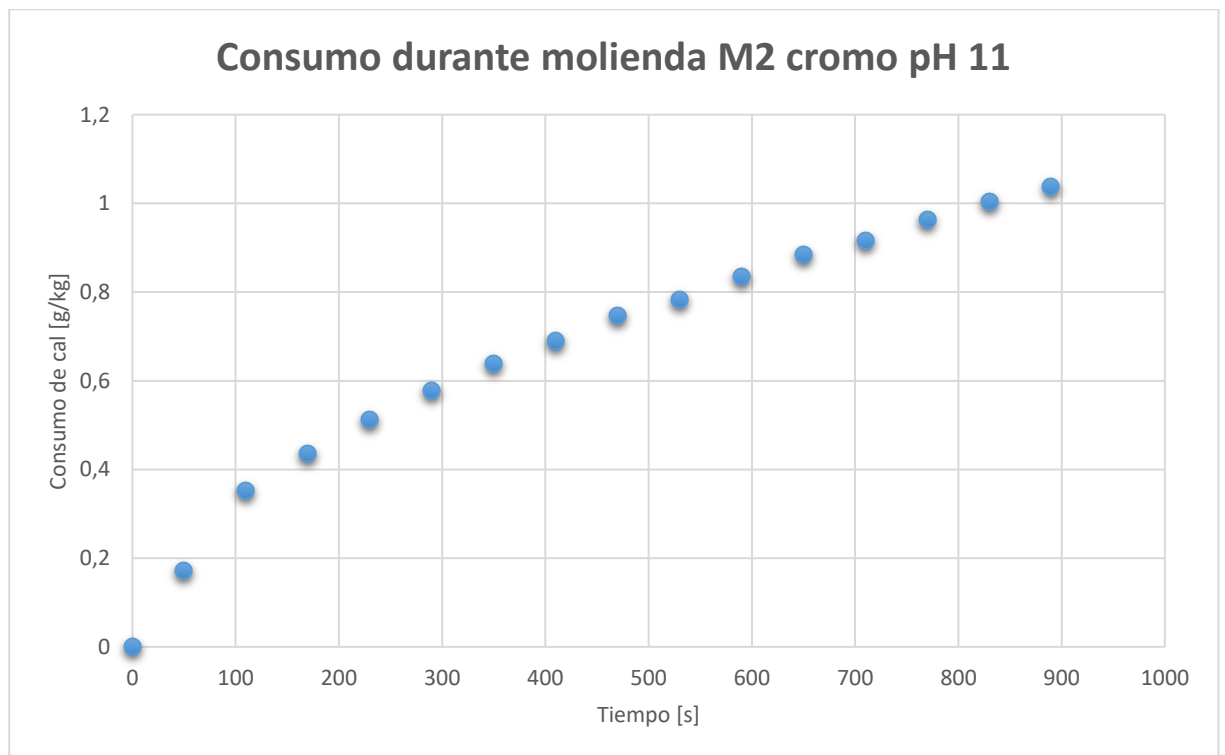


Figura 82 Consumo de cal en el tiempo M2 medios cromados pH 11

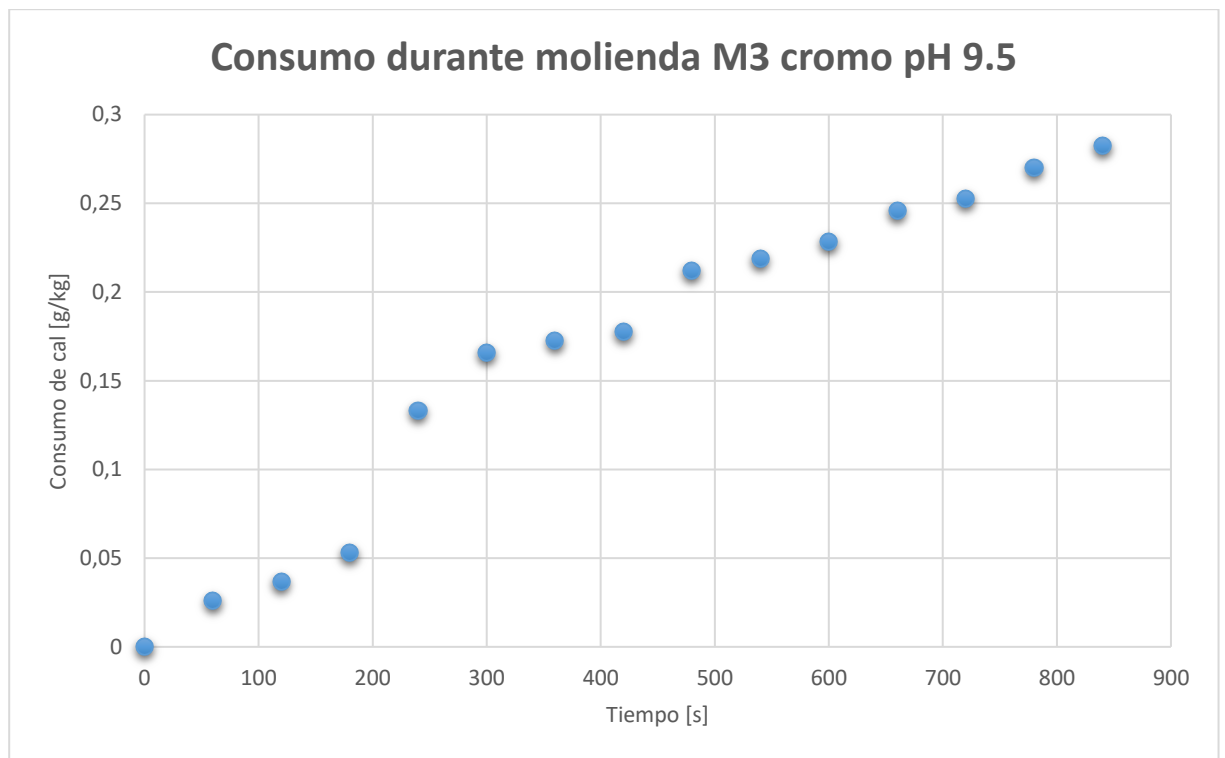


Figura 83 Consumo de cal en el tiempo M3 medios cromados pH 9,5

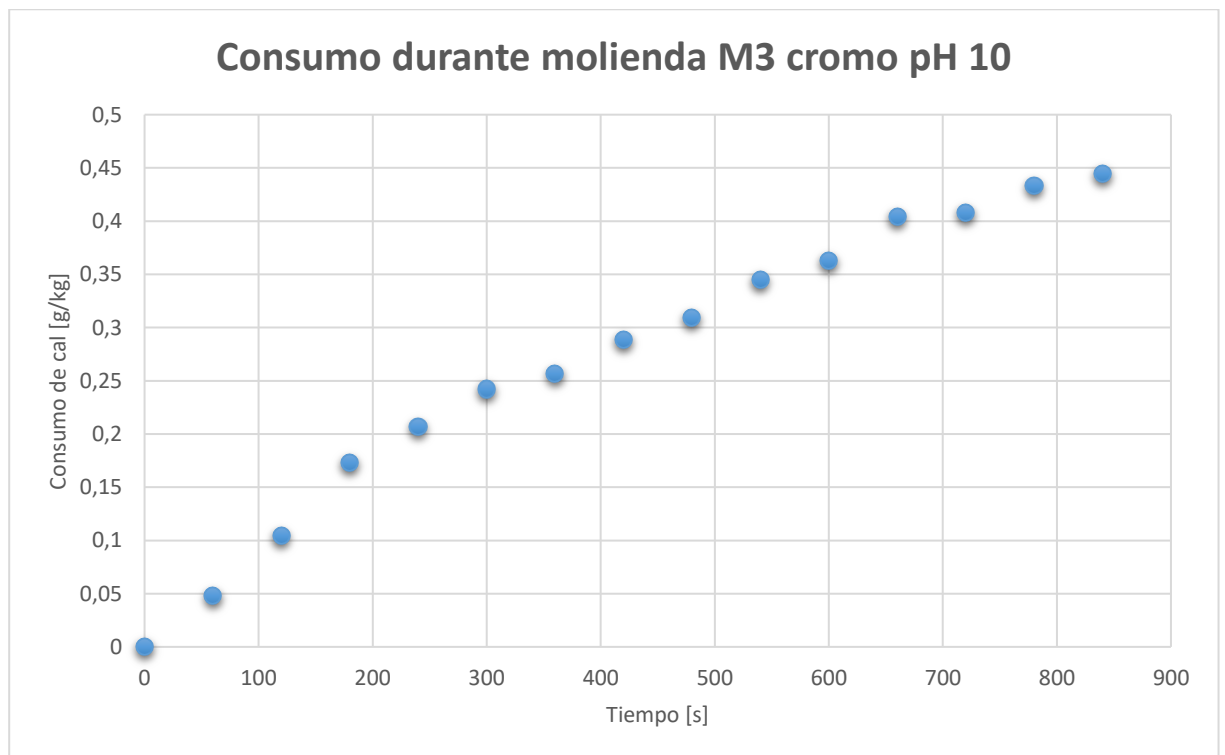


Figura 84 Consumo de cal en el tiempo M3 medios cromados pH 10

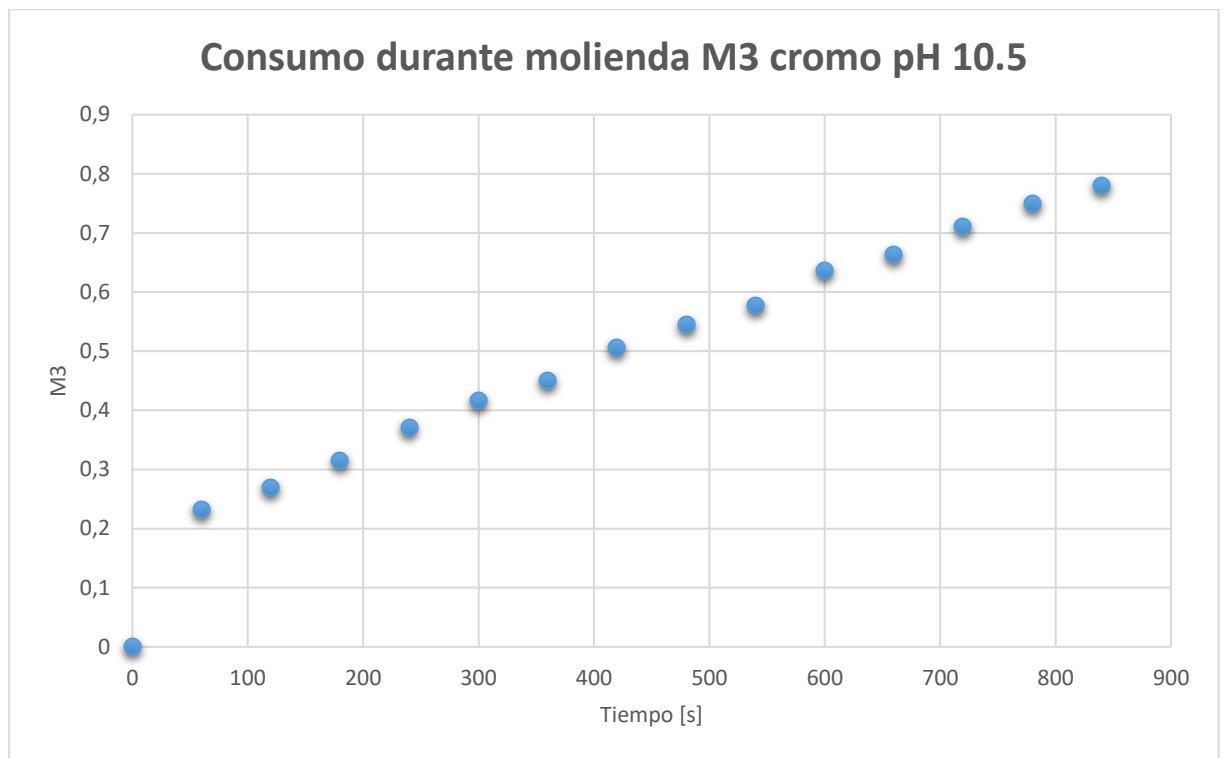


Figura 85 Consumo de cal en el tiempo M3 medios cromados pH 10,5

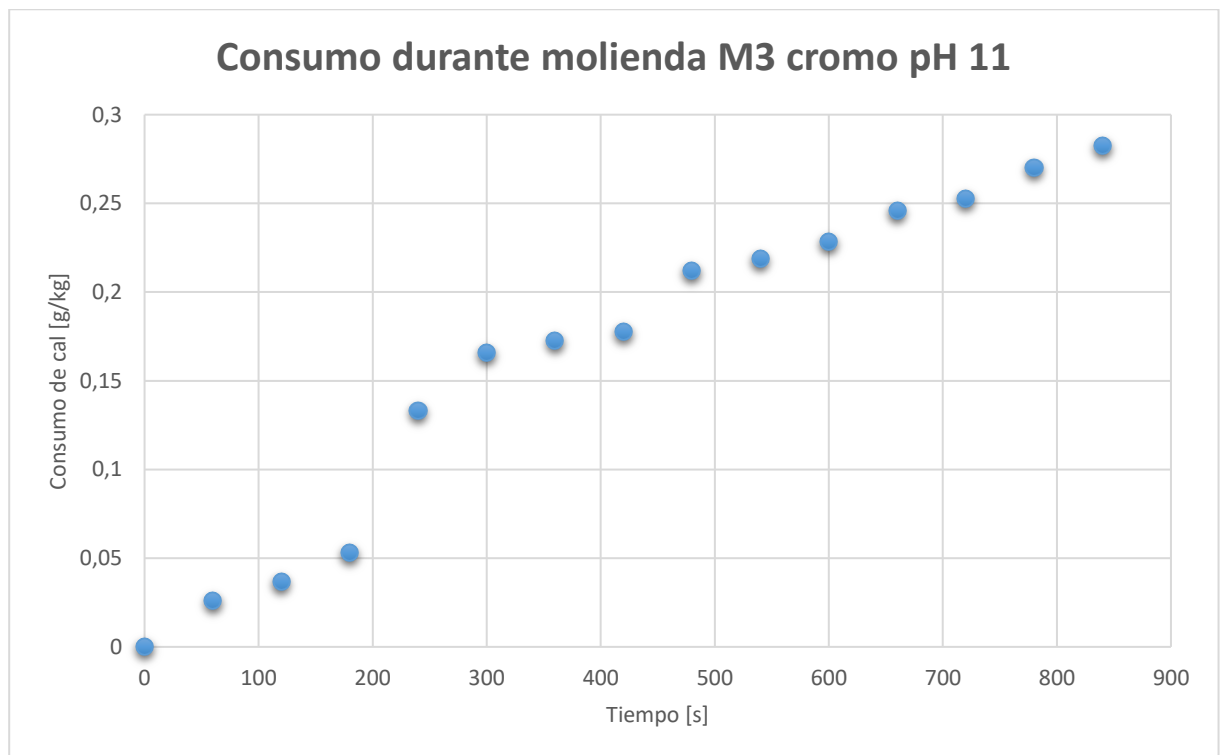


Figura 86 Consumo de cal en el tiempo M3 medios cromados pH 11

8.4.3.2 Curvas de consumo de cal

Considerando la metodología que se considera para la elaboración de curvas de consumo de cal, se desarrolla para las curvas controlando parámetros con el molino Magotteaux y las curvas tradicionales.

Para las curvas con el molino Magotteaux se considera toda la cal consumida con el fin de mantener el pH constante. Para ello, se considera el desarrollo ya mostrado en Anexo 8.4.3.2 y se llega a:

Tabla 47 Curva consumo de cal controlando parámetros M1 v1

Curva controlando parámetros M1 v1	
pH	g/kg
8,94	0
9,5	0,26
10	0,39
10,5	0,78
11	0,94

Tabla 48 Curva de consumo de cal controlando parámetros M1 v2

Curva controlando parámetros M1 v2	
pH	g/kg
8,77	0
9,5	0,27
10	0,56
10,5	0,67
11	0,99

Tabla 49 Curva de consumo de cal controlando parámetros M2 v1

Curva controlando parámetros M2 v1	
pH	g/kg
8,42	0
9,5	0,27
10	0,41
10,5	0,61
11	1,06

Tabla 50 Curva de consumo de cal controlando parámetros v2

Curva controlando parámetros M2 v2	
pH	g/kg
8,38	0
9,5	0,28
10	0,44
10,5	0,68
11	1,02

Tabla 51 Curva de consumo de cal controlando parámetros M3 v1

Curva controlando parámetros M3 v1	
pH	g/kg
8,47	0
9,5	0,26
10	0,41
10,5	0,90
11	1,18

Tabla 52 Curva de consumo de cal controlando parámetros M2 v2

Curva controlando parámetros M3 v2	
pH	g/kg
8,51	0
9,5	0,31
10	0,42
10,5	0,71
11	1,17

Para medios cromados:

Tabla 53 Curva de consumo de cal controlando parámetros M1 medios cromados

Curva controlando parámetros M1 cromo	
pH	g/kg
8,51	0
9,5	0,26
10	0,41
10,5	0,70
11	1,26

Tabla 54 Curva de consumo de cal controlando parámetros M2 medios cromados

Curva controlando parámetros M2 cromo	
pH	g/kg
8,51	0
9,5	0,25
10	0,37
10,5	0,66
11	1,04

Tabla 55 Curva de consumo de cal controlando parámetros M3 medios cromados

Curva controlando parámetros M3 cromo	
pH	g/kg
8,51	0
9,5	0,28
10	0,44
10,5	0,78
11	1,17

Una vez terminado la elaboración de curvas mediante el método tradicional se procede a la elaboración de las curvas de consumo de cal mediante el método tradicional. Usando la concentración se transforma de volumen de solución agregado a gramos de cal, llegando a los siguientes resultados:

Tabla 56 Curva de consumo de cal método tradicional M1

Curva tradicional 2 M1		
ml	g	pH
0	0,00	8,3
3	0,04	8,84
5	0,07	8,96
9	0,12	9,35
12	0,16	9,4
15	0,20	9,36
18	0,24	9,41
21	0,28	9,36
25	0,33	9,4
29	0,39	9,47
33	0,44	9,53
37	0,49	9,61
45	0,60	9,9
53	0,71	9,95
60	0,80	10,1
69	0,92	10,21
78	1,04	10,59
87	1,16	10,8
96	1,28	10,95
105	1,40	11,15
114	1,52	11,3
123	1,64	11,35

Tabla 57 Curva de consumo de cal método tradicional M2

Curva tradicional 1 M2		
ml	g/kg	pH
0	0,00	8
2	0,03	8,05
7	0,09	8,7
14	0,19	9,1
19	0,25	9,2
26	0,35	8,9
31	0,41	9,1
36	0,48	9,15
43	0,57	9,25
48	0,64	9,3
55	0,74	9
64	0,86	9,5
73	0,98	9,65
82	1,10	10,03
89	1,19	10,25
96	1,28	10,31
103	1,38	10,49
110	1,47	10,6
117	1,56	10,7
124	1,66	10,73
131	1,75	10,76
138	1,84	10,83
145	1,94	10,91
154	2,06	10,94
161	2,15	11
168	2,25	11,05
175	2,34	11,11

Tabla 58 Curva de consumo de cal método tradicional M3

Curva tradicional M3		
ml	g/kg	pH
0	0,00	7,96
5	0,03	8,20
10	0,07	8,21
15	0,10	8,29
20	0,13	8,52
25	0,17	8,54
30	0,20	8,58
39	0,26	8,60
48	0,32	8,64
57	0,38	8,74
66	0,44	8,87
75	0,50	8,84
84	0,56	9,07
93	0,62	9,28
102	0,68	9,63
111	0,74	9,87
120	0,80	10,03
129	0,86	10,20
138	0,92	10,29
147	0,98	10,42
156	1,04	10,48
165	1,10	10,52
174	1,16	10,57
183	1,22	10,62
192	1,28	10,72
201	1,34	10,76
210	1,40	10,77
219	1,46	10,79
228	1,52	10,85
237	1,58	10,88
246	1,64	10,92
255	1,70	10,98
264	1,76	11,00
273	1,82	11,00
282	1,88	11,02
291	1,94	11,06
300	2,00	11,07
309	2,06	11,08
318	2,12	11,09
327	2,18	11,09

Para medios cromados:

Tabla 59 Curva de consumo de cal método tradicional M1 medios cromados

Curva tradicional M1 cromo		
ml	g/kg	pH
0	0,00	7,95
5	0,03	8,08
11	0,07	8,17
17	0,11	8,09
24	0,16	8,09
32	0,21	8,16
40	0,27	8,15
48	0,32	8,15
58	0,39	8,24
67	0,45	8,41
76	0,51	8,60
85	0,57	8,85
95	0,64	9,21
104	0,70	9,47
114	0,76	9,51
123	0,82	9,68
132	0,88	9,85
143	0,96	9,98
160	1,07	10,15
180	1,20	10,43
200	1,34	10,41
220	1,47	10,56
250	1,67	10,65
280	1,87	10,80
310	2,07	10,85
340	2,27	10,93
400	2,67	11,06

Tabla 60 Curva de consumo de cal método tradicional M2 medios cromados

Curva tradicional M2 cromo		
ml	g/kg	pH
0	0,00	7,85
7	0,09	8,63
13	0,18	8,95
19	0,26	9,01
25	0,34	9,02
35	0,47	9,07
45	0,61	9,17
55	0,74	9,36
65	0,88	9,52
80	1,08	10,05
95	1,29	10,48
110	1,49	10,79
125	1,69	10,94
140	1,90	11,04
155	2,10	11,14
170	2,30	11,18

Tabla 61 Curva de consumo de cal M3 medios cromados

Curva tradicional M3 cromo		
ml	g/kg	pH
0	0,00	7,93
10	0,14	9,12
20	0,27	9,24
30	0,41	9,31
40	0,54	9,39
50	0,68	9,42
65	0,88	9,62
80	1,09	9,87
100	1,36	10,54
120	1,63	10,87
140	1,90	11,07
160	2,17	11,13
180	2,44	11,25

Todo lo anterior se resume en los siguientes gráficos:

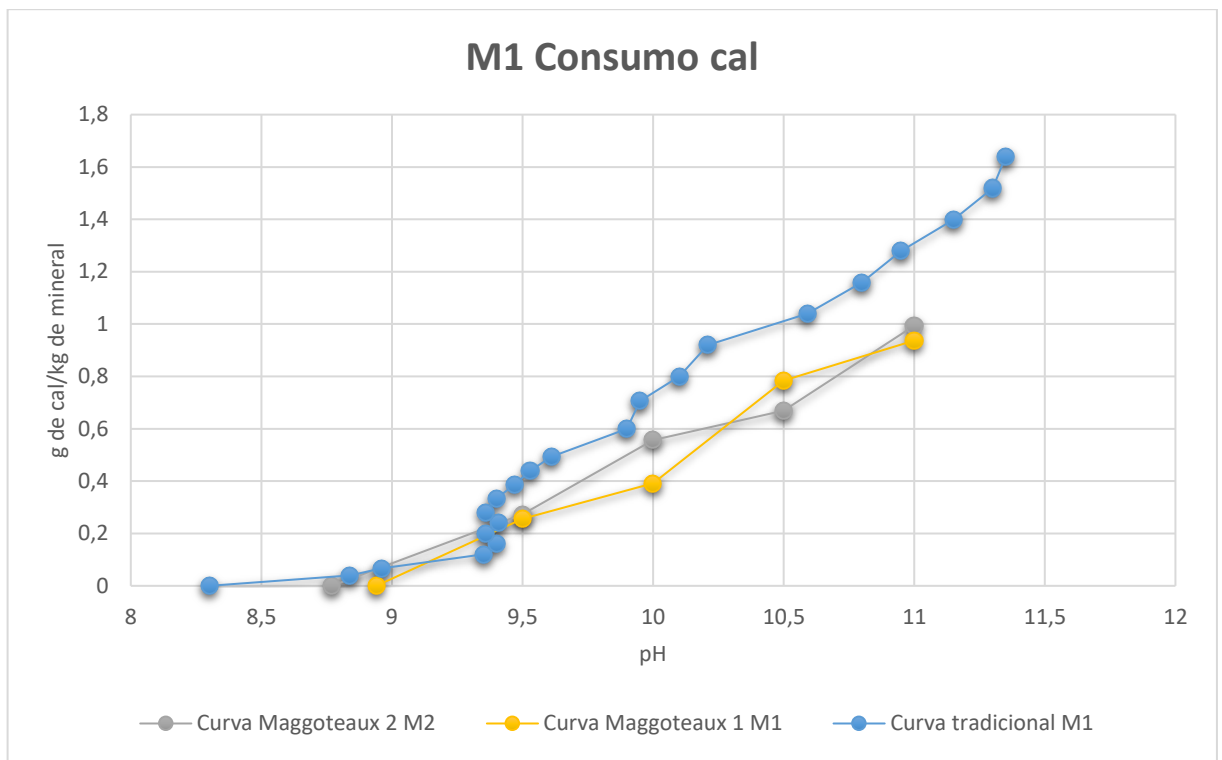


Figura 87 Curvas consumo de cal M1 medios de acero

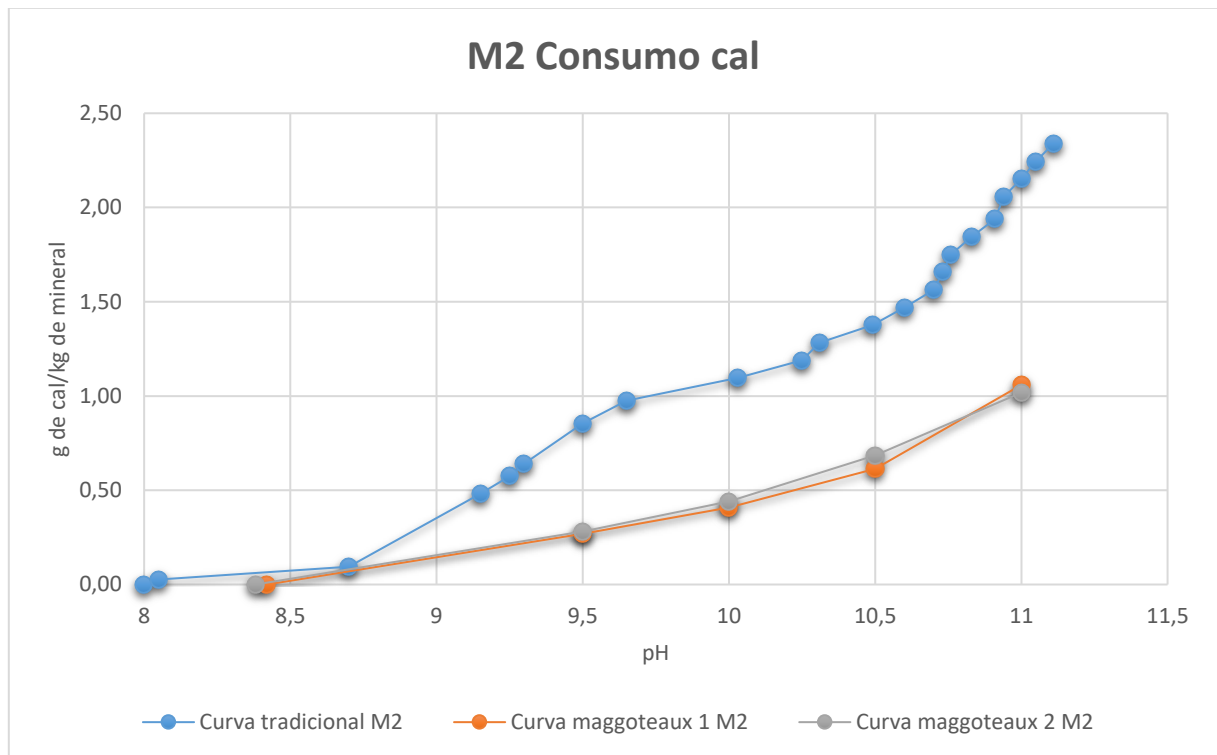


Figura 88 Curvas de consumo de cal M2 medios de acero

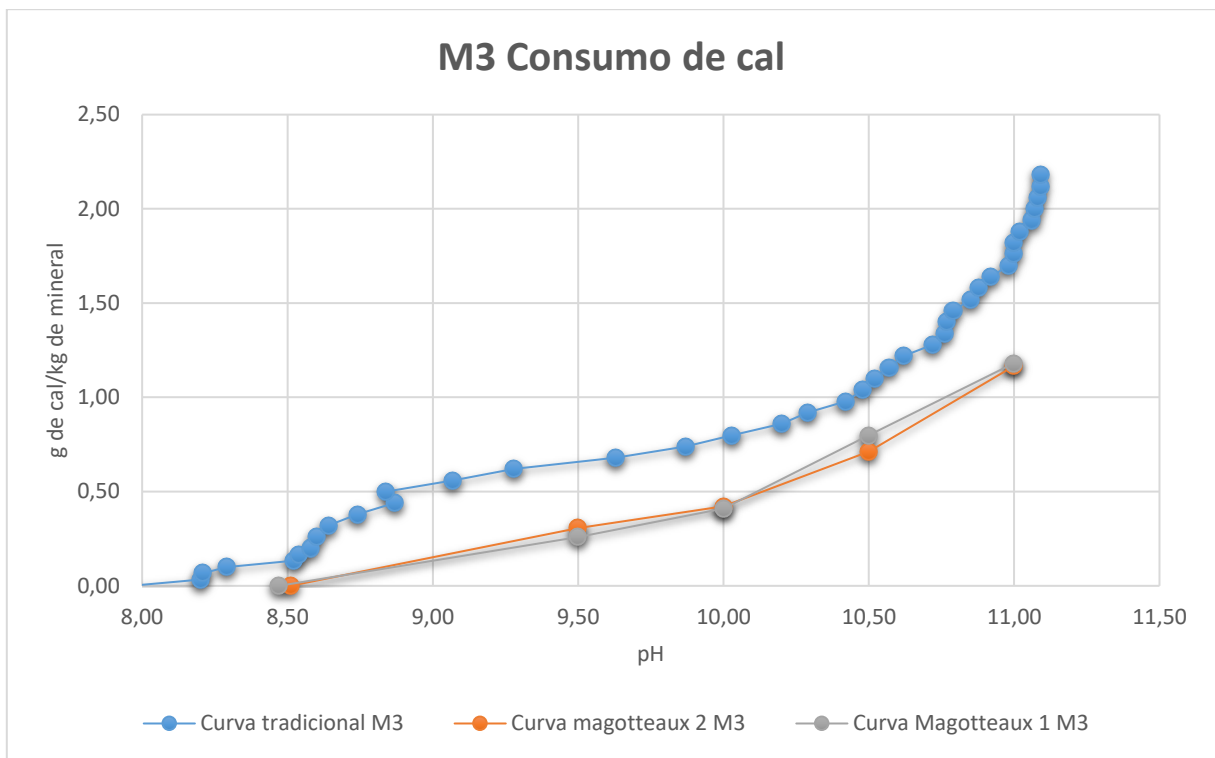


Figura 89 Curvas de consumo de cal M3 medios de acero

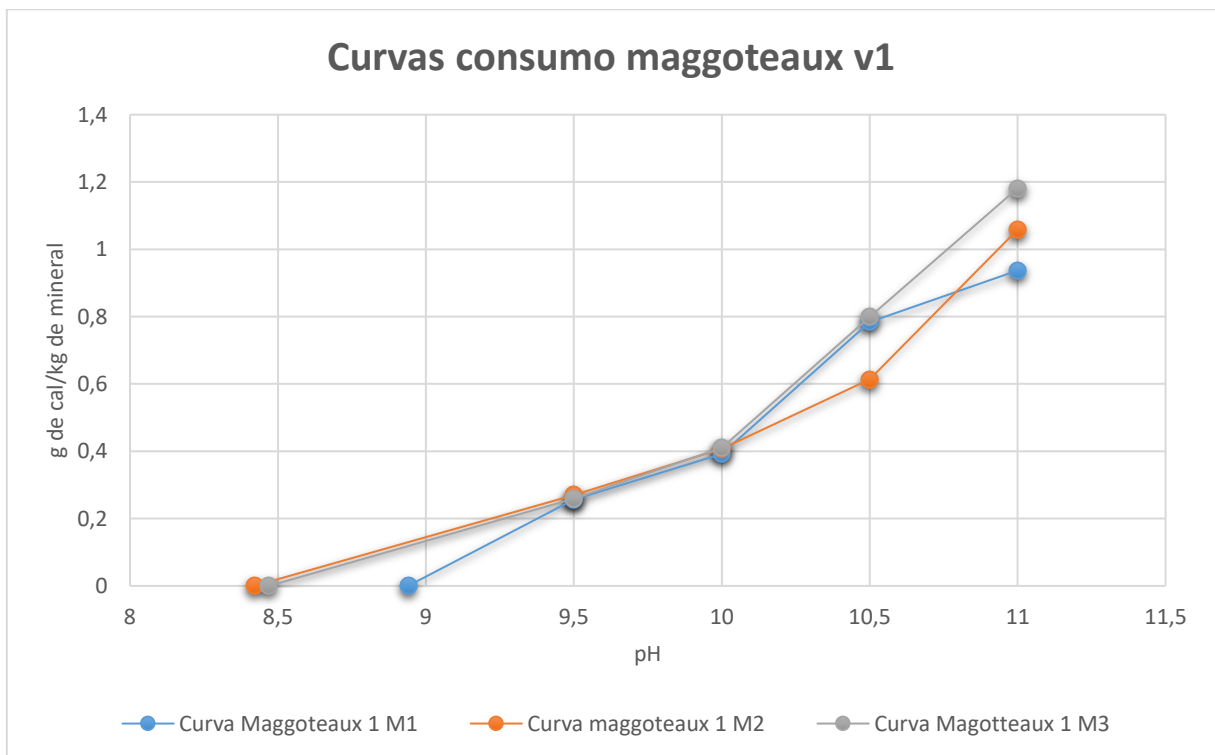


Figura 90 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios de acero v1

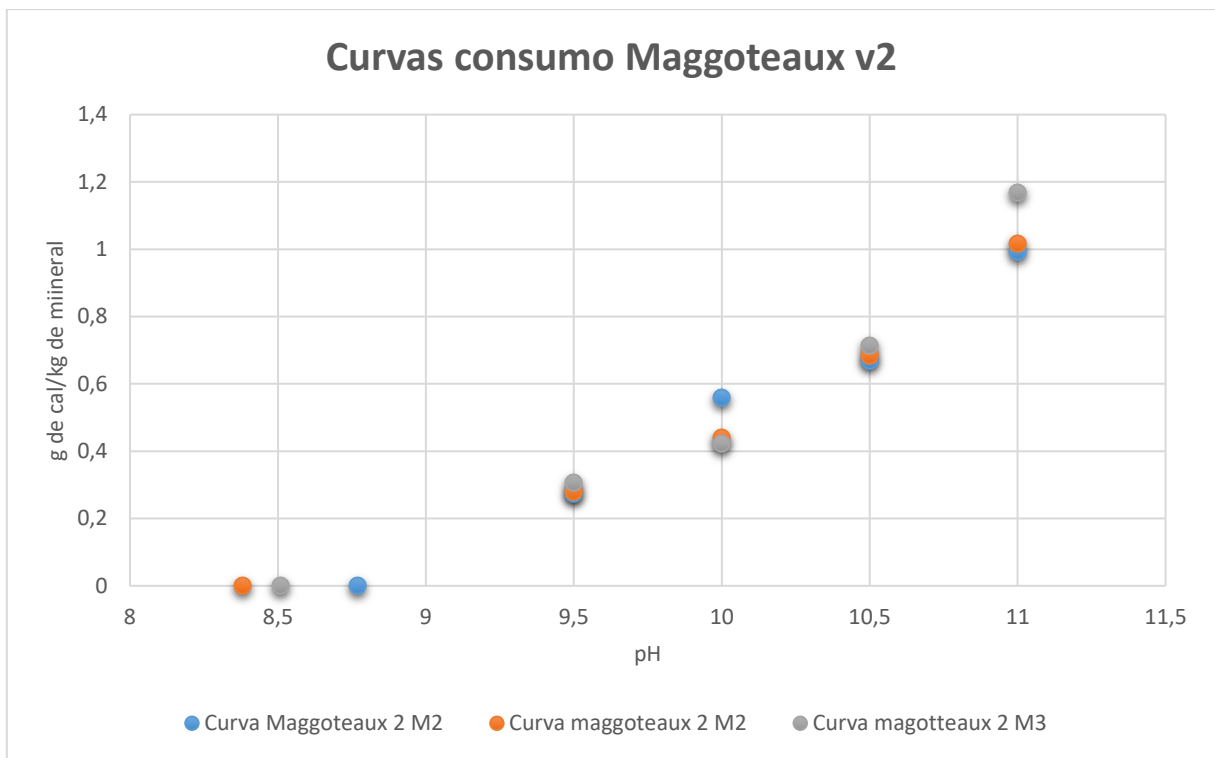


Figura 91 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios de acero v2

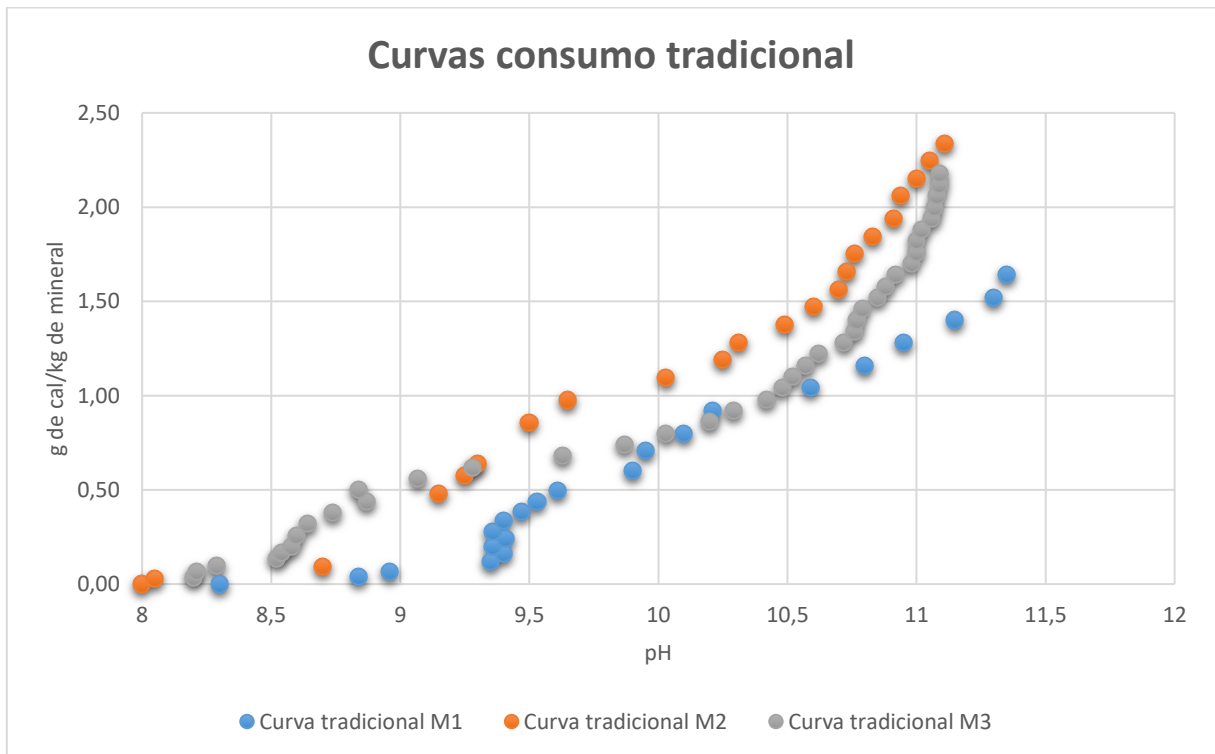


Figura 92 Comparación curvas de consumo de cal método tradicional

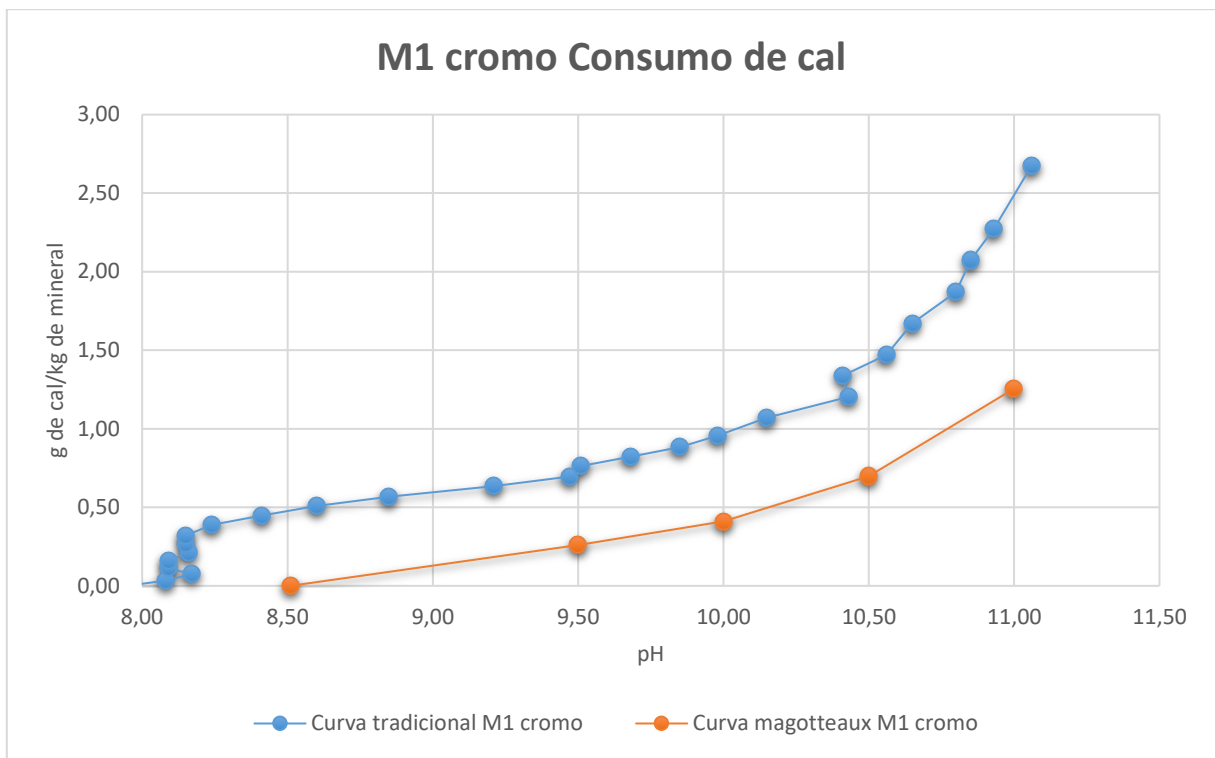


Figura 93 Curvas de consumo de cal M1 medios cromados

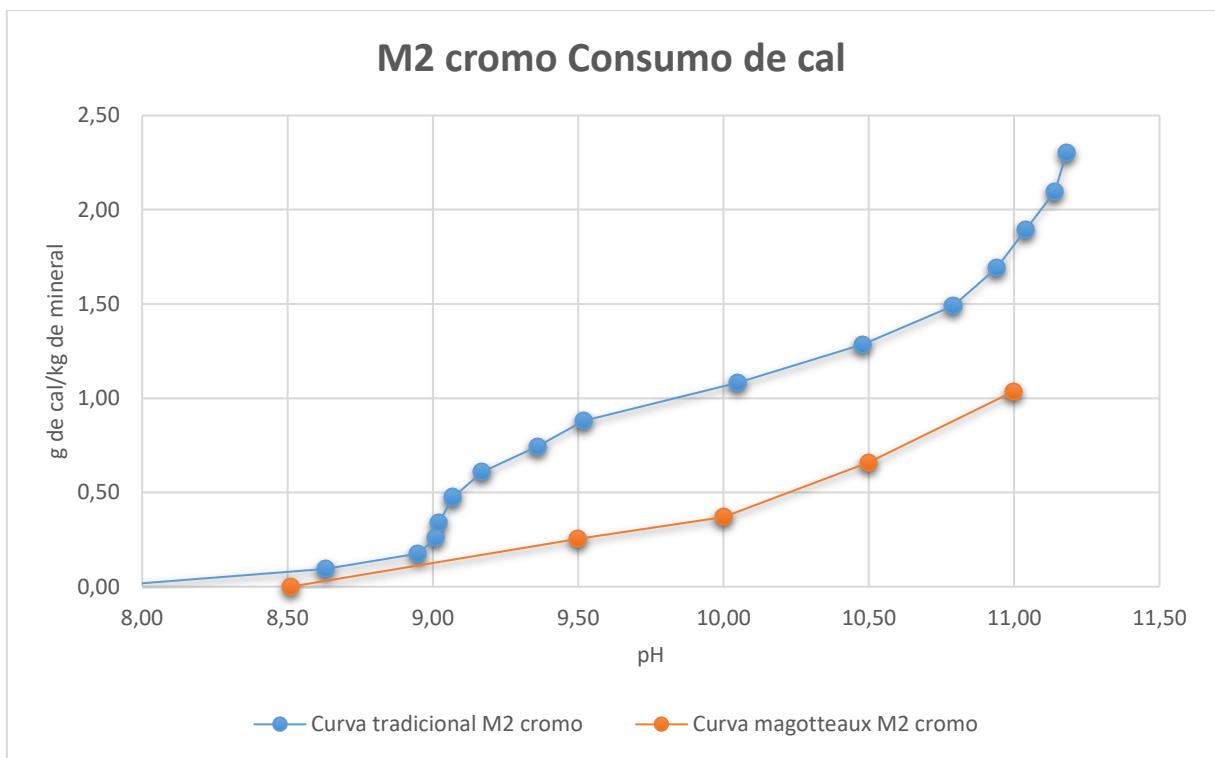


Figura 94 Curva de consumo de cal M2 medios cromados

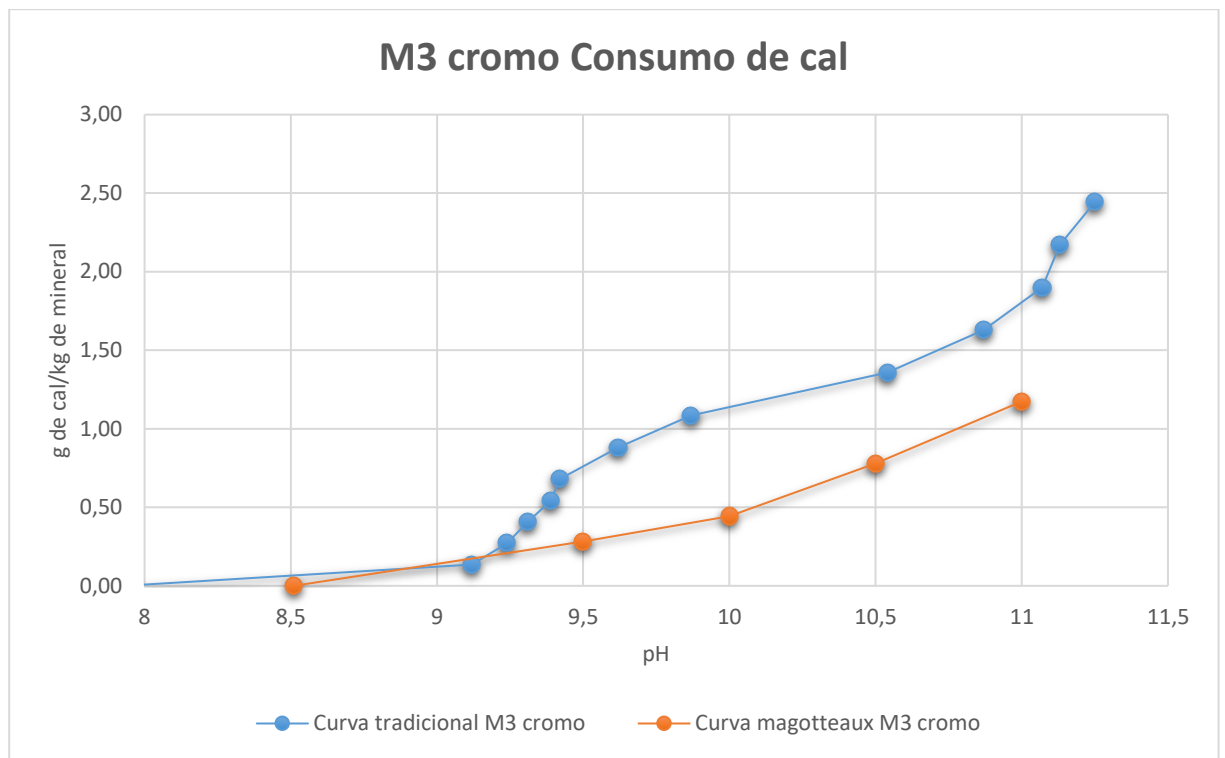


Figura 95 Curvas de consumo de cal M3 medios cromados

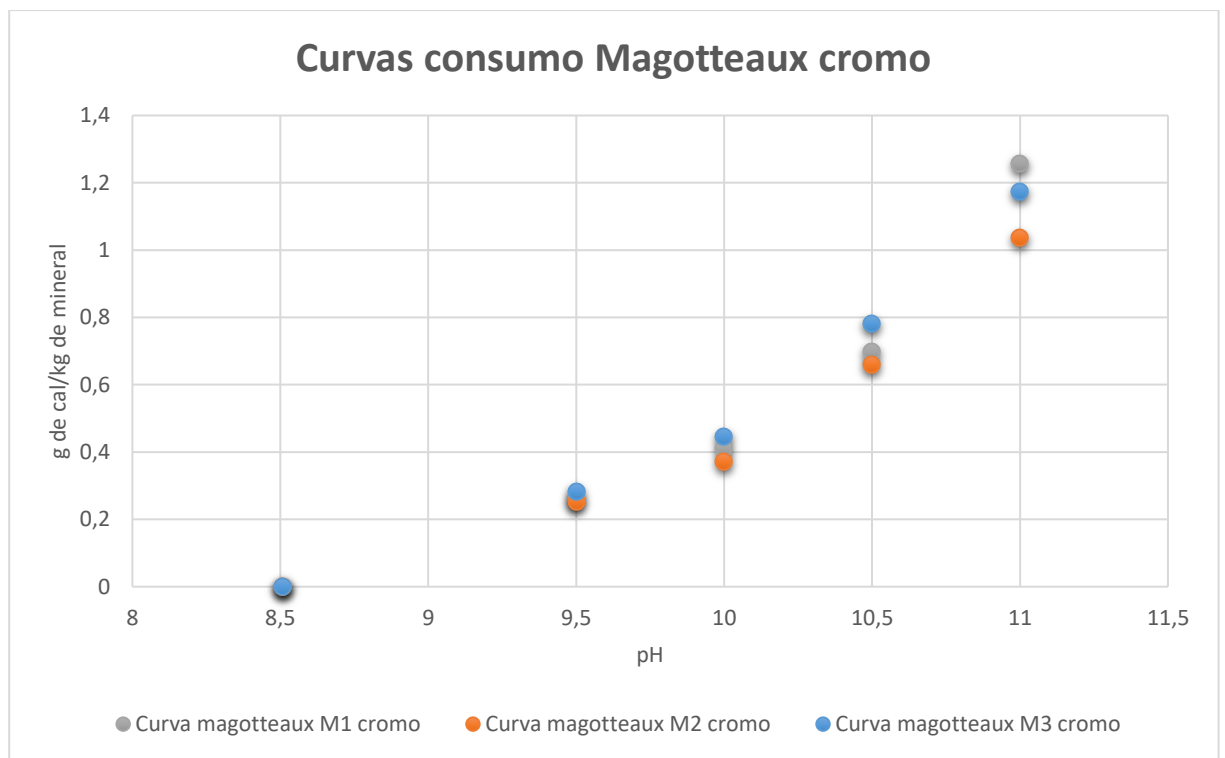


Figura 96 Comparación curvas de consumo de cal con control de parámetros medios cromados

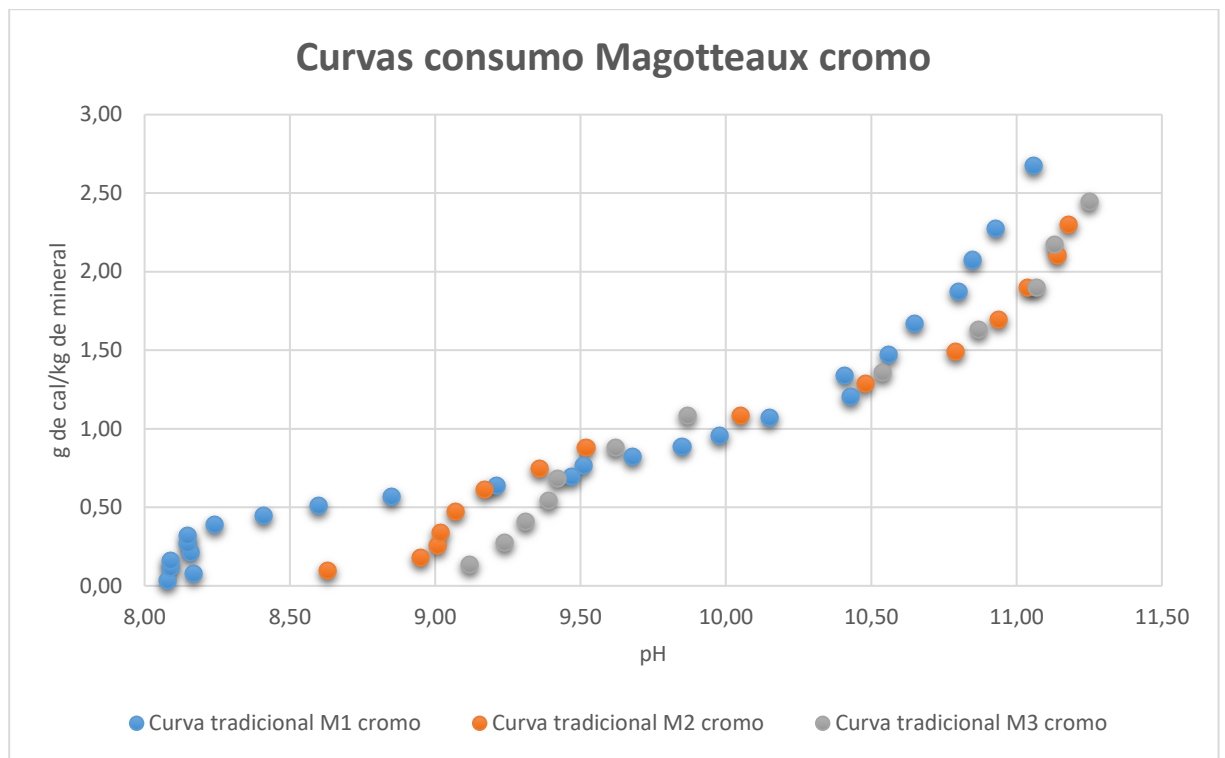


Figura 97 Comparación curvas de consumo de cal método tradicional

8.4.3.3 Comportamiento del pH y voltaje en el tiempo

Luego de realizar los experimentos, se presentan a continuación la medición de parámetros en el tiempo. No se considera la medición de oxígeno disuelto debido a recomendaciones experimentales con el molino [11] y debido a que, al observar las muestras realizadas, se registra principalmente ruido:

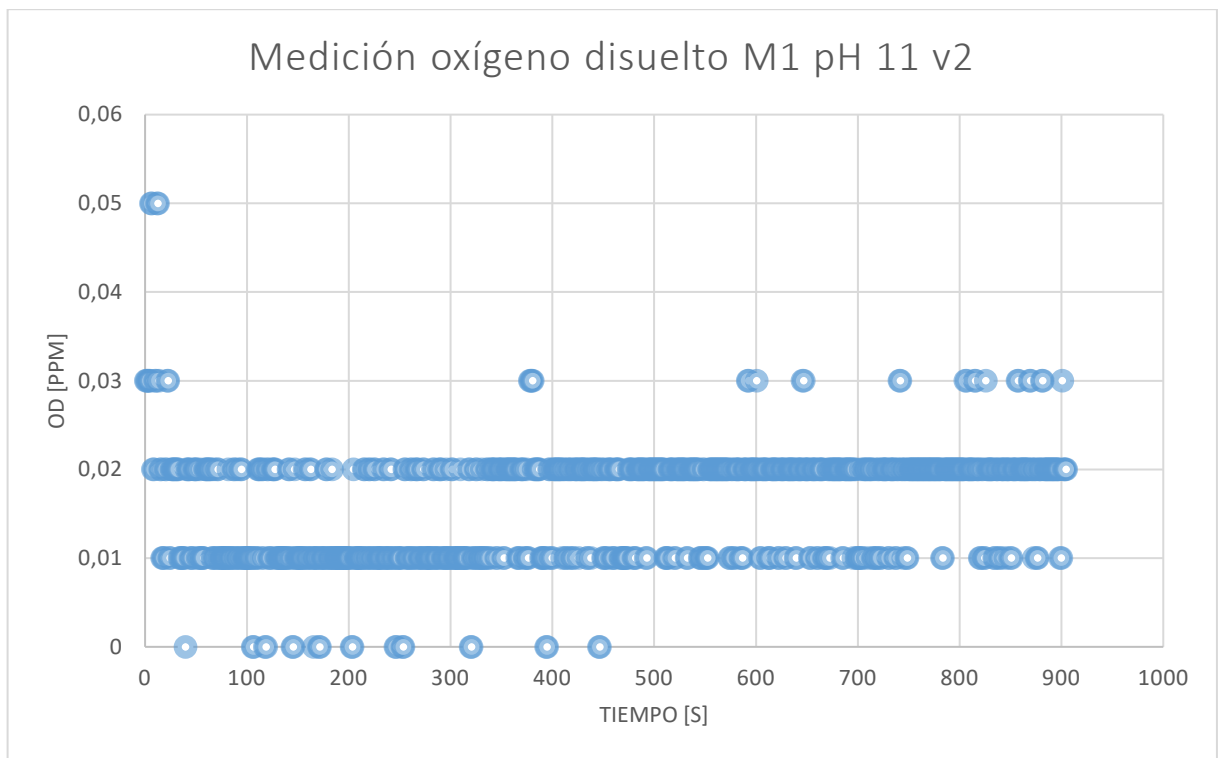


Figura 98 Oxígeno disuelto en el tiempo M1 pH 11 v2

Descartando el Oxígeno disuelto, la medición de parámetros es:

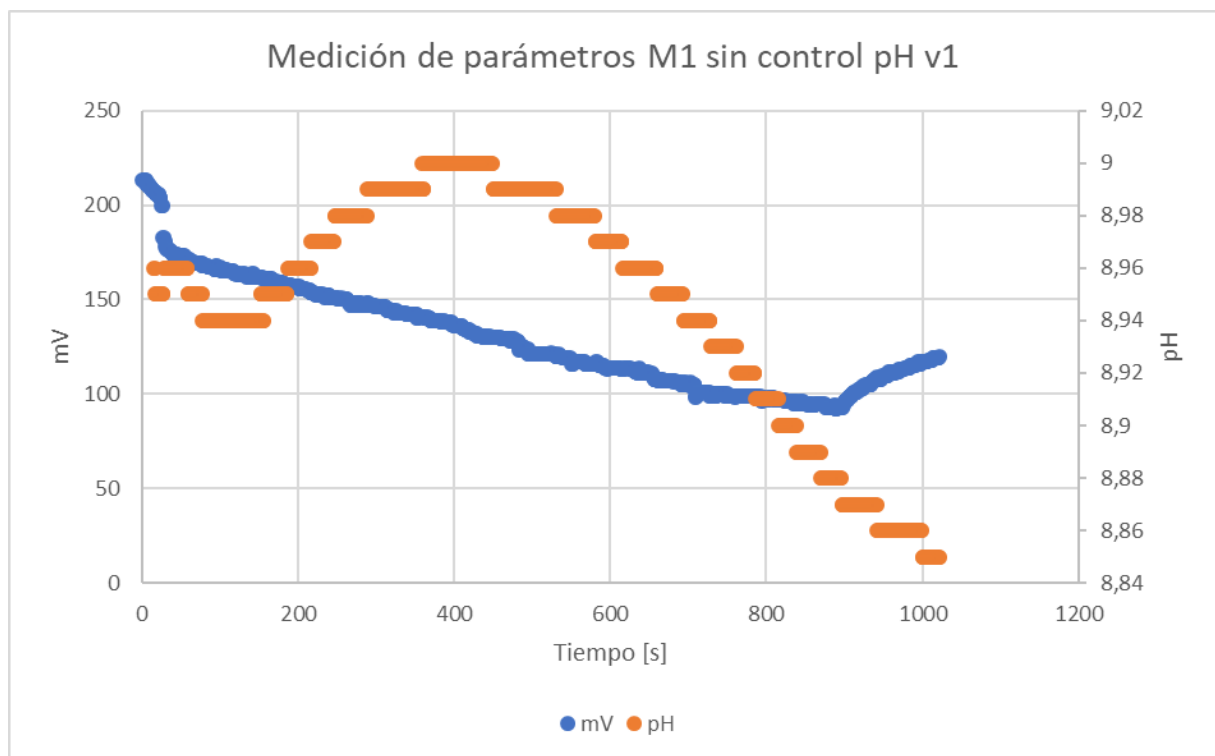


Figura 99 Medición de parámetros M1 sin control pH v1

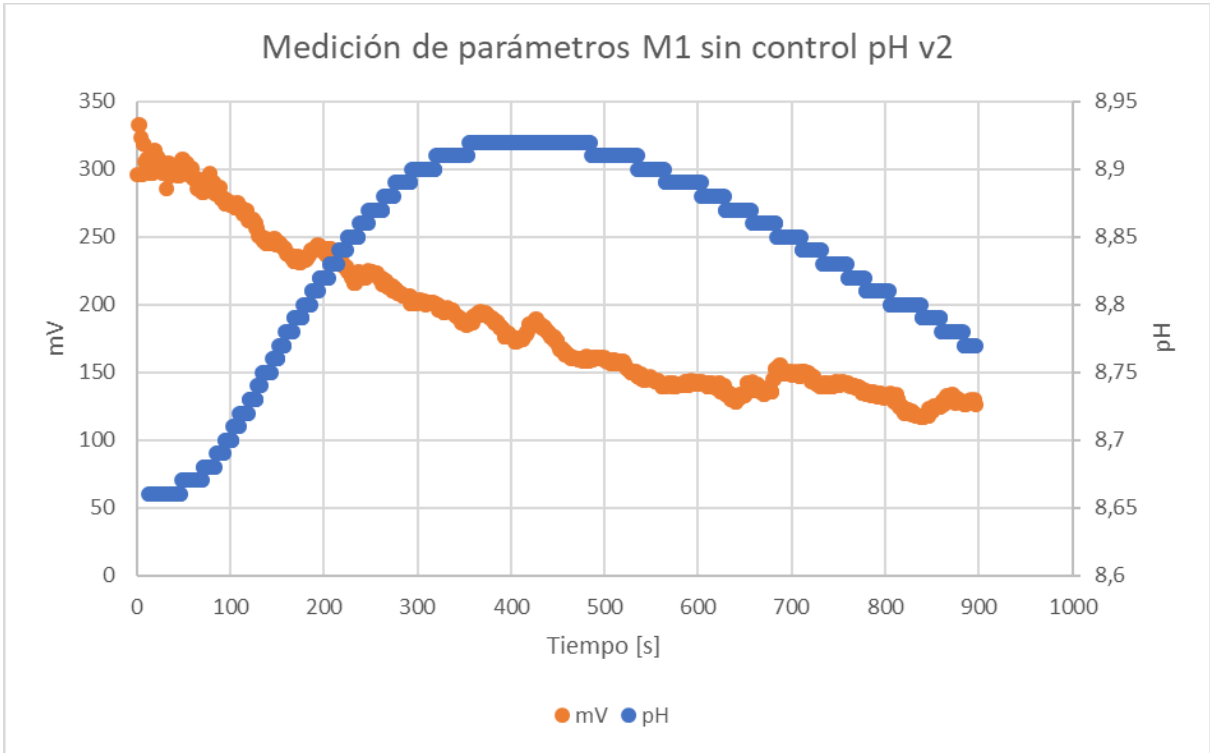


Figura 100 Medición de parámetros M1 sin control pH v2

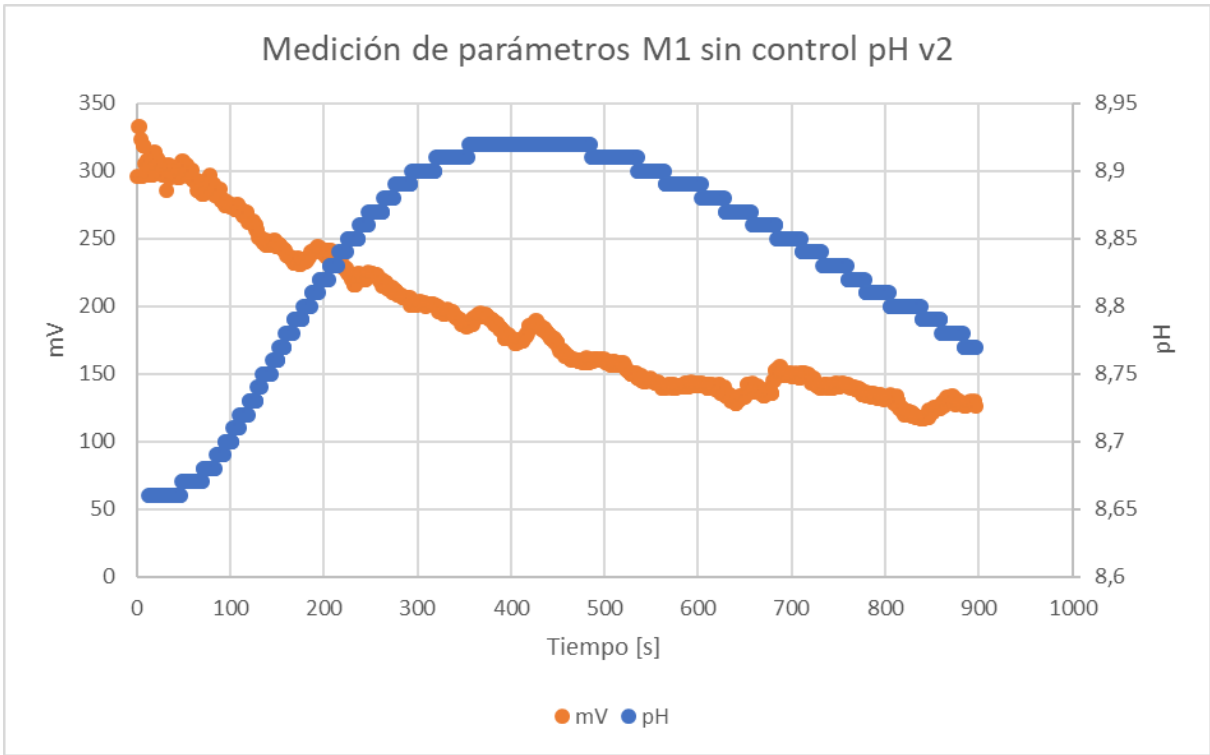


Figura 101 Medición parámetros M1 pH 9,5 v1

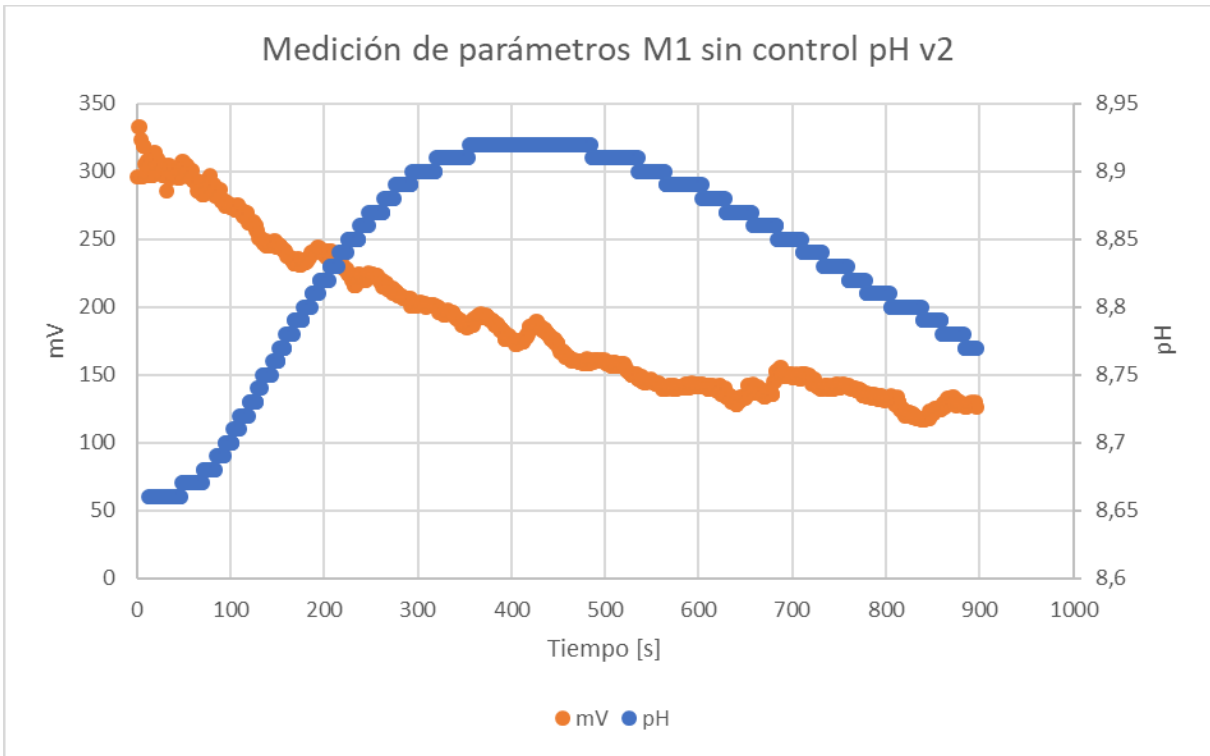


Figura 102 Medición parámetros M1 pH 9,5 v2

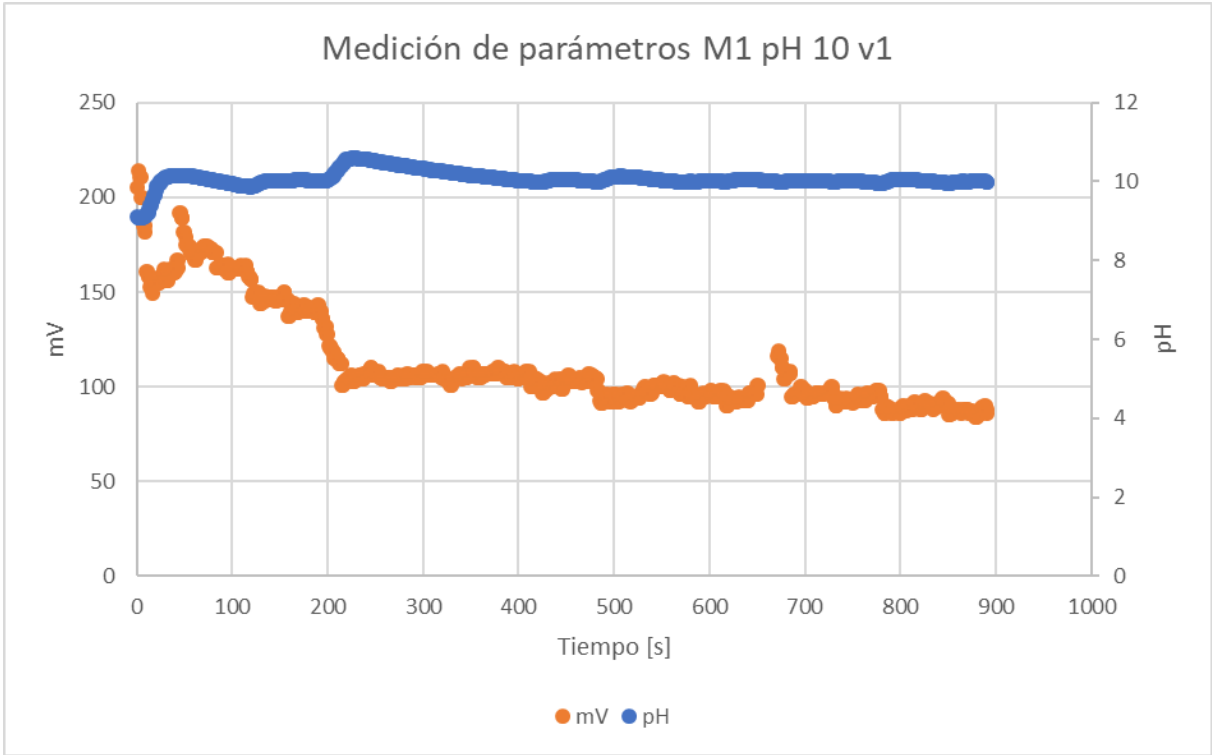


Figura 103 Medición parámetros M1 pH 10 v1

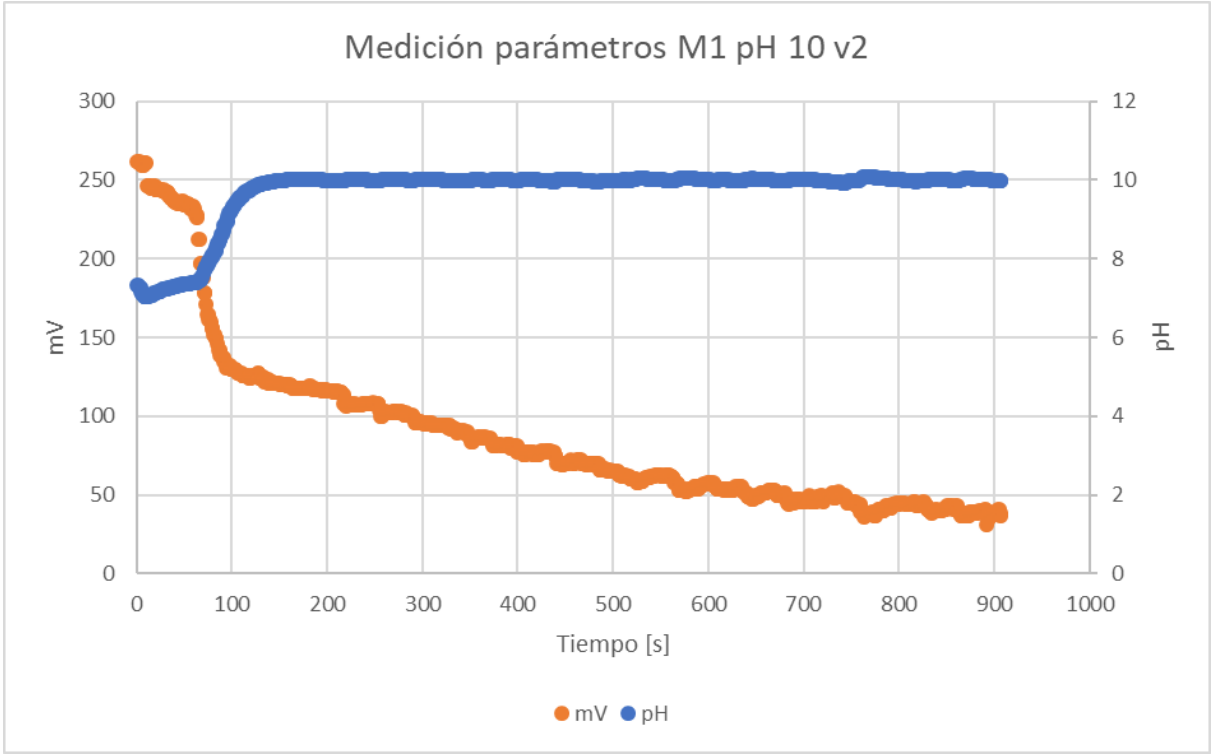


Figura 104 Medición parámetros M1 pH 10 v2

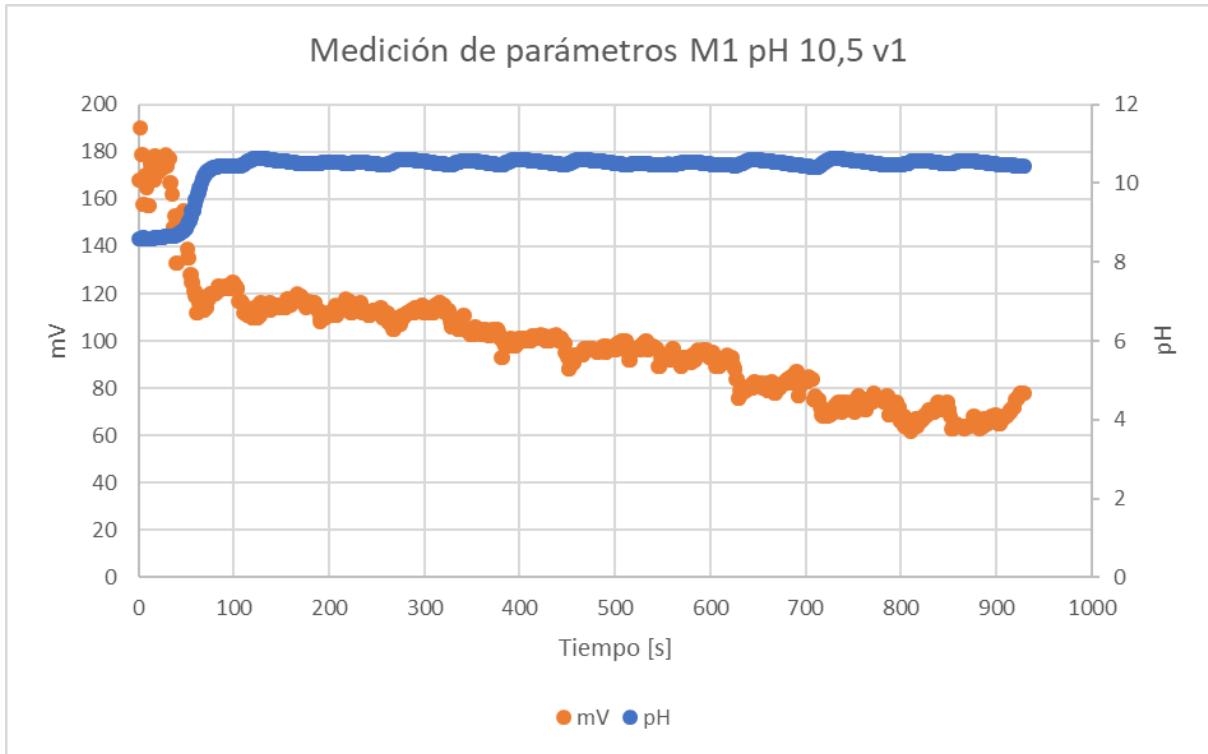


Figura 105 Medición parámetros M1 pH 10,5 v1

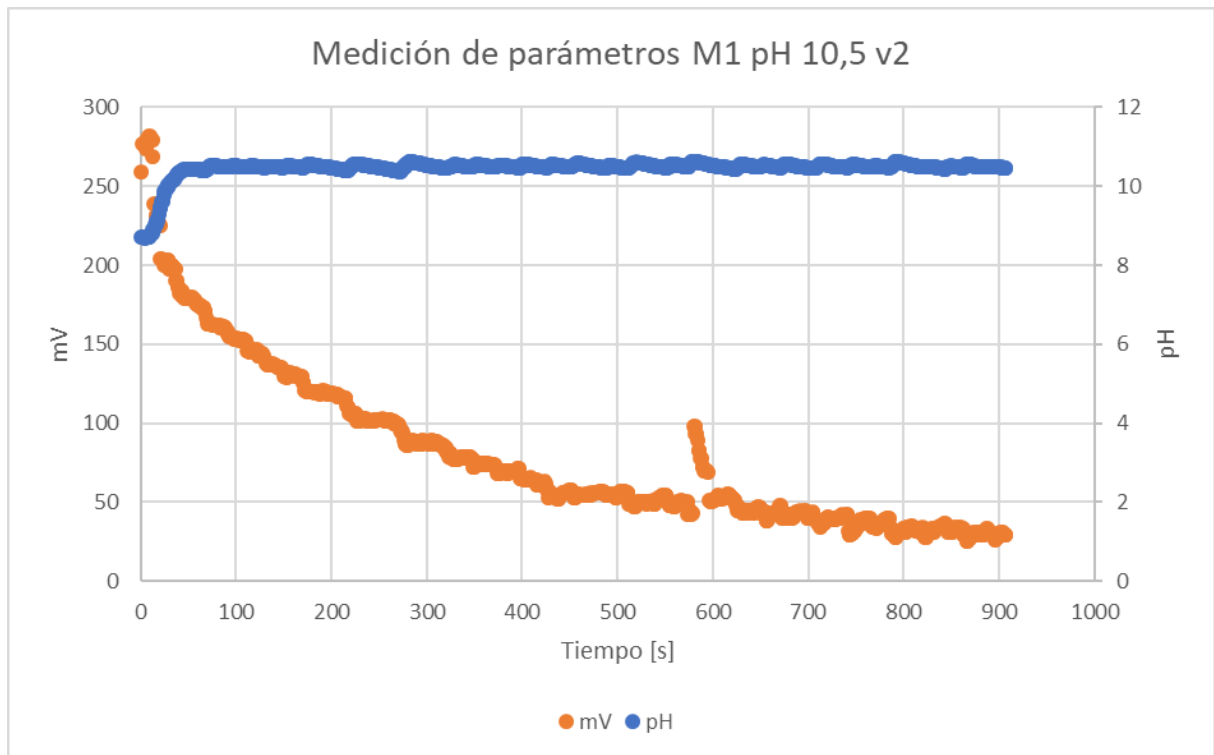


Figura 106 Medición parámetros M1 pH 10,5 v2

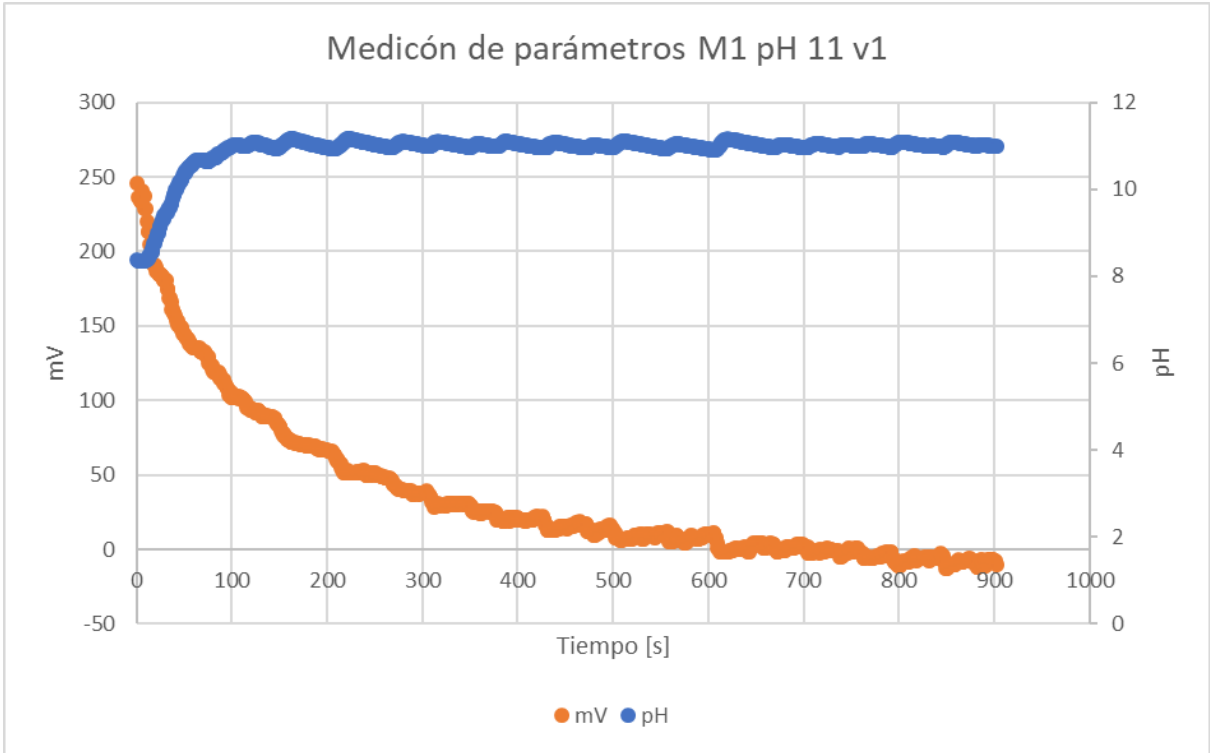


Figura 107 Medición parámetros M1 pH 11 v1

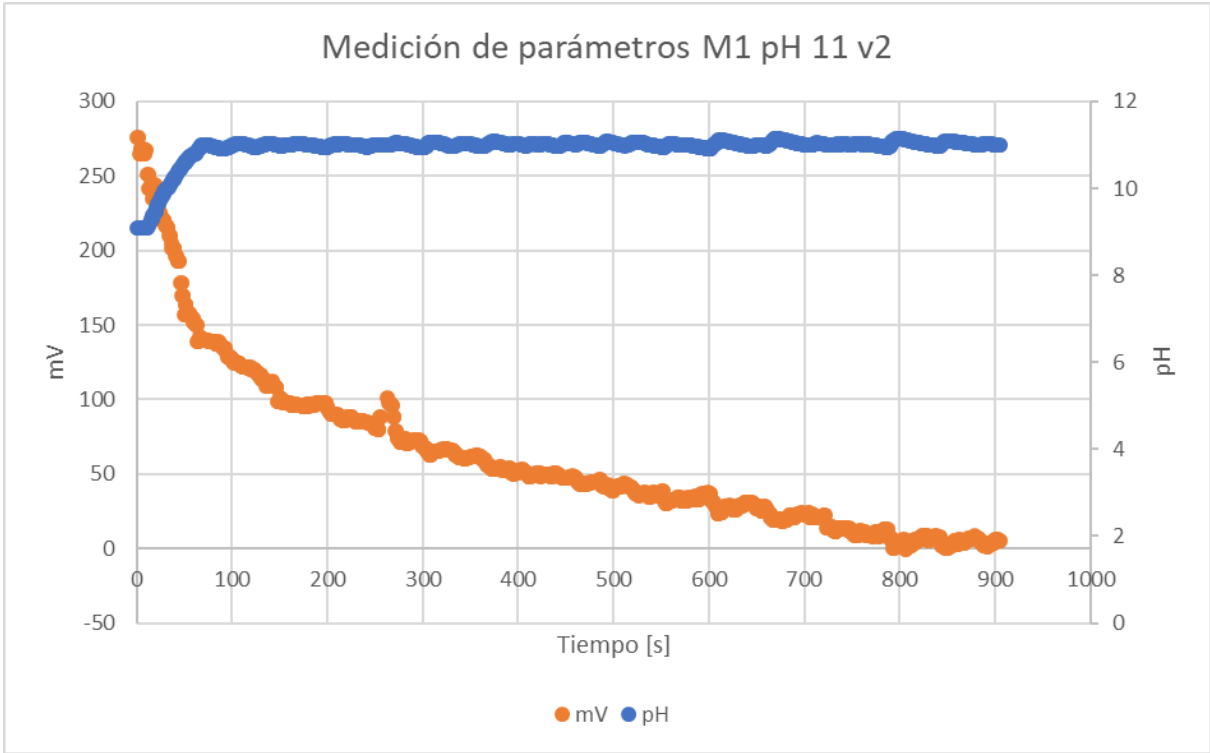


Figura 108 Medición parámetros M1 pH 11 v2

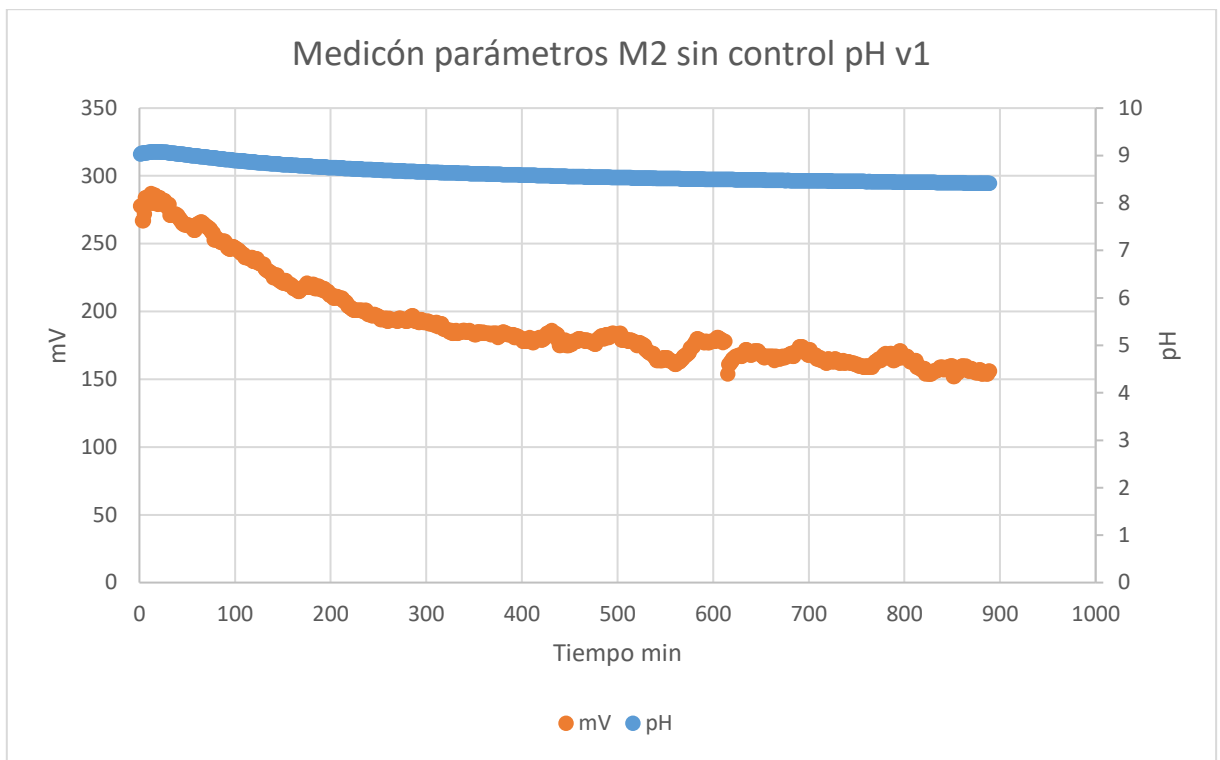


Figura 109 Medición parámetros M2 sin control pH v1

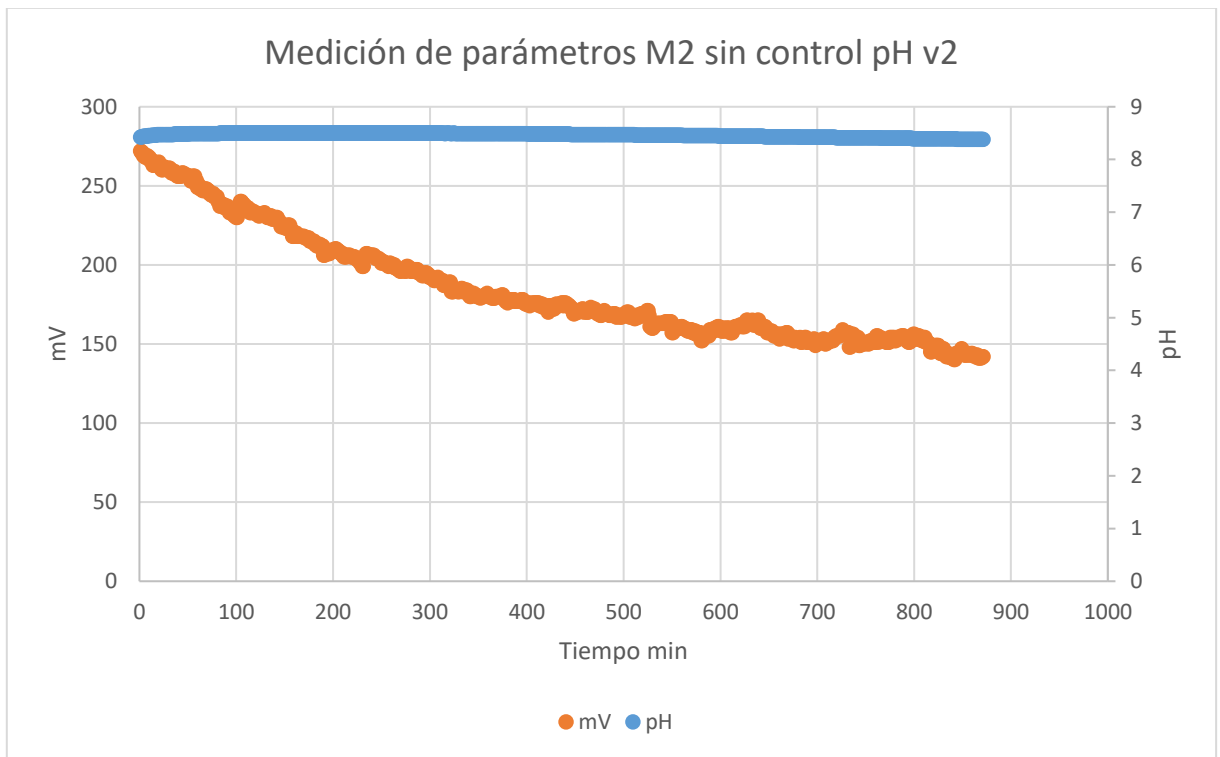


Figura 110 Medición parámetros M2 sin control pH v2

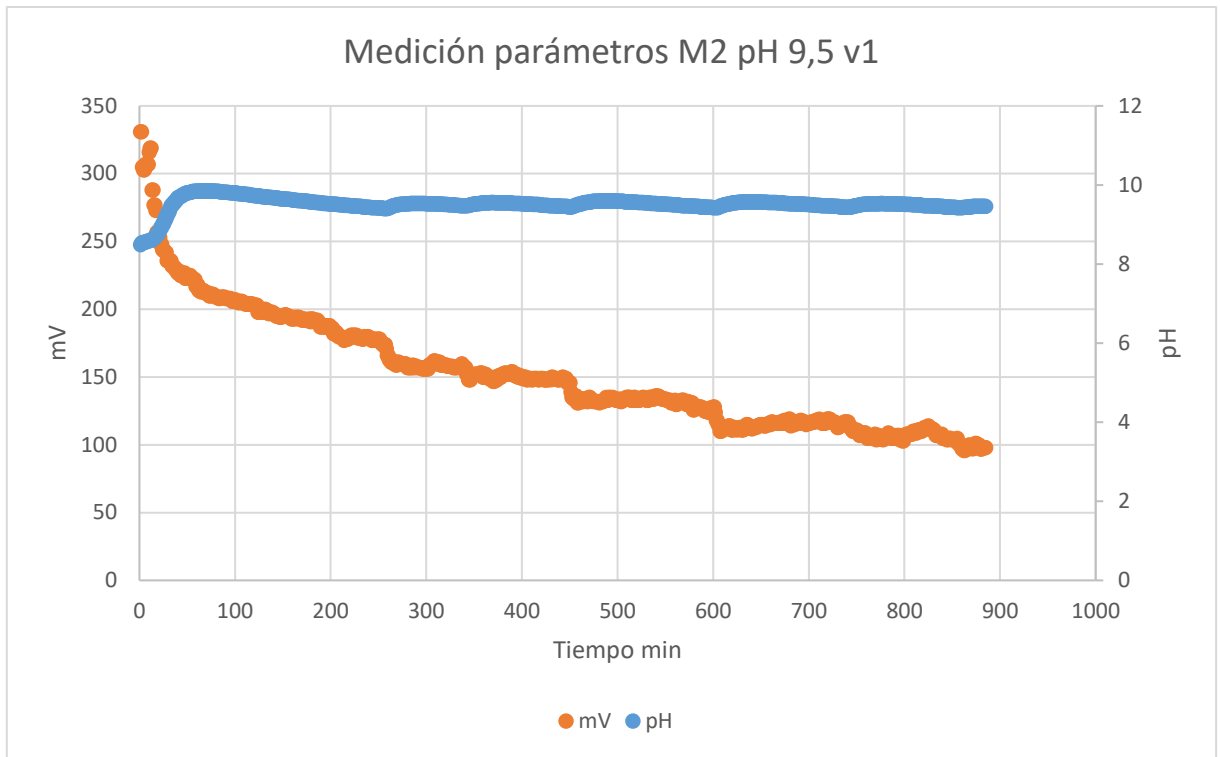


Figura 111 Medición parámetros M2 pH 9,5 v1

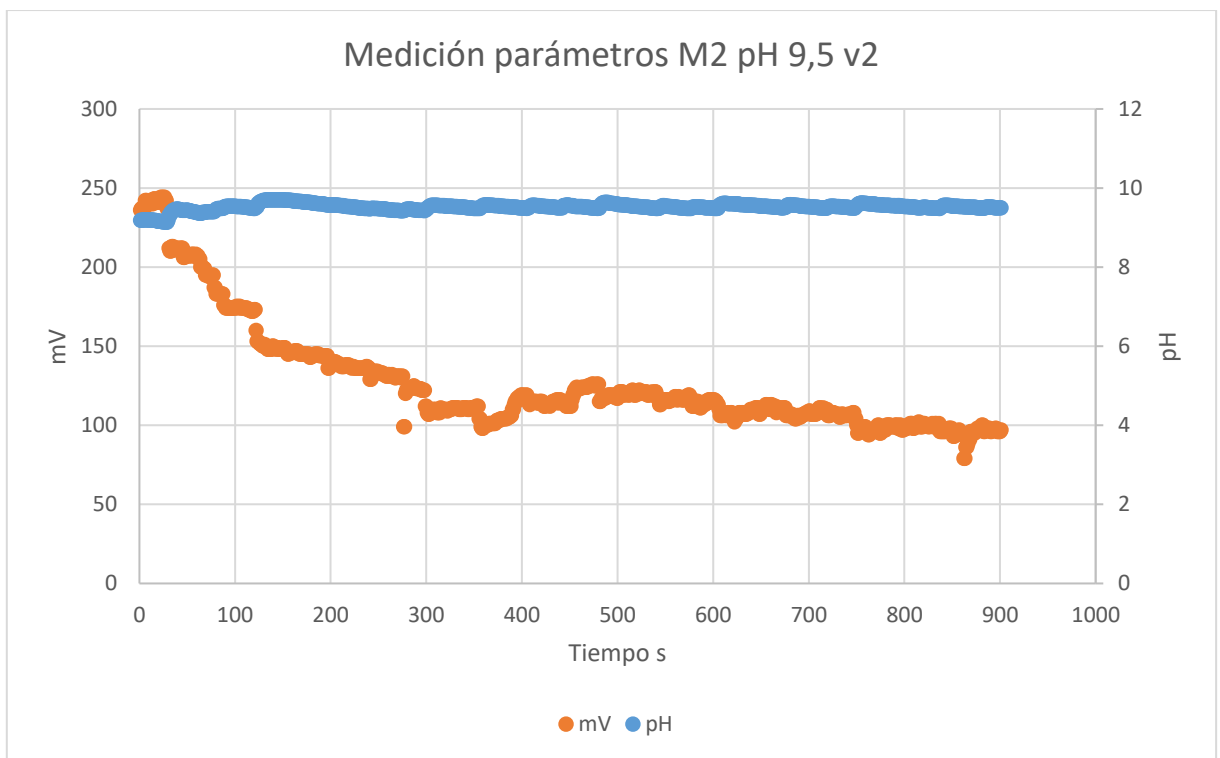


Figura 112 Medición parámetros M2 pH 9,5 v2

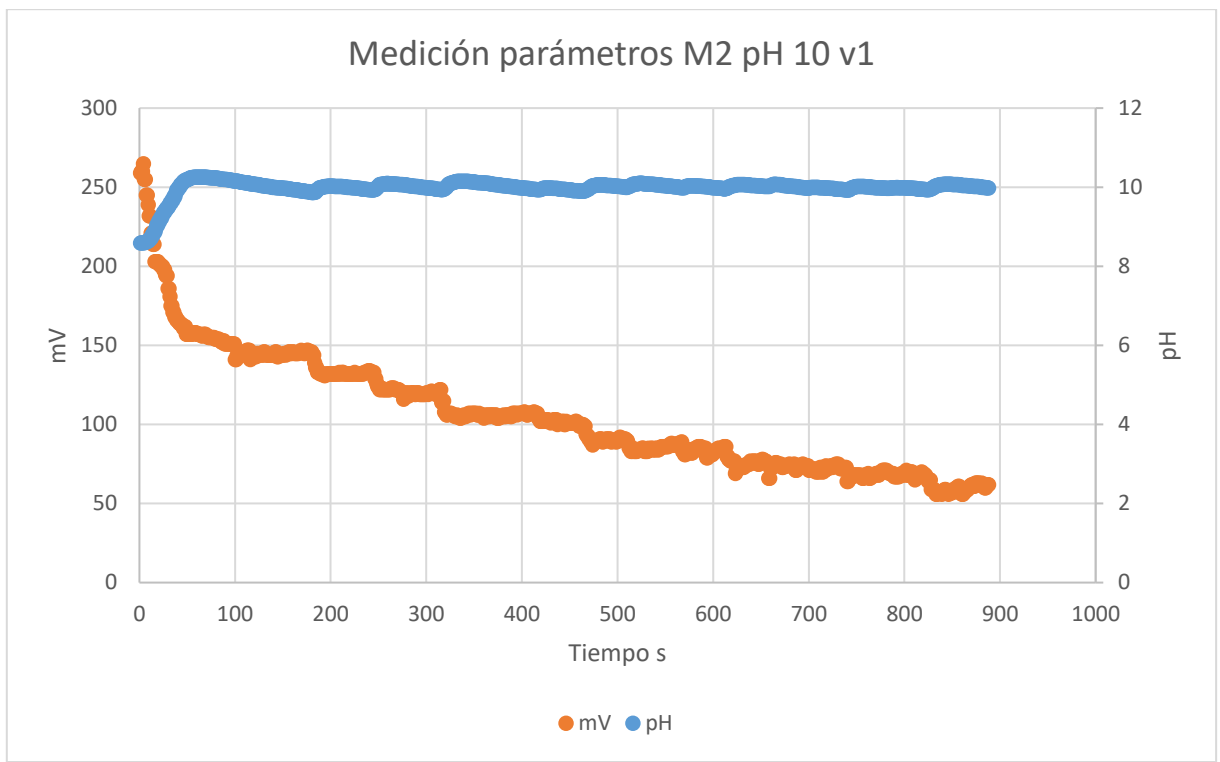


Figura 113 Medición parámetros M2 pH 10 v1

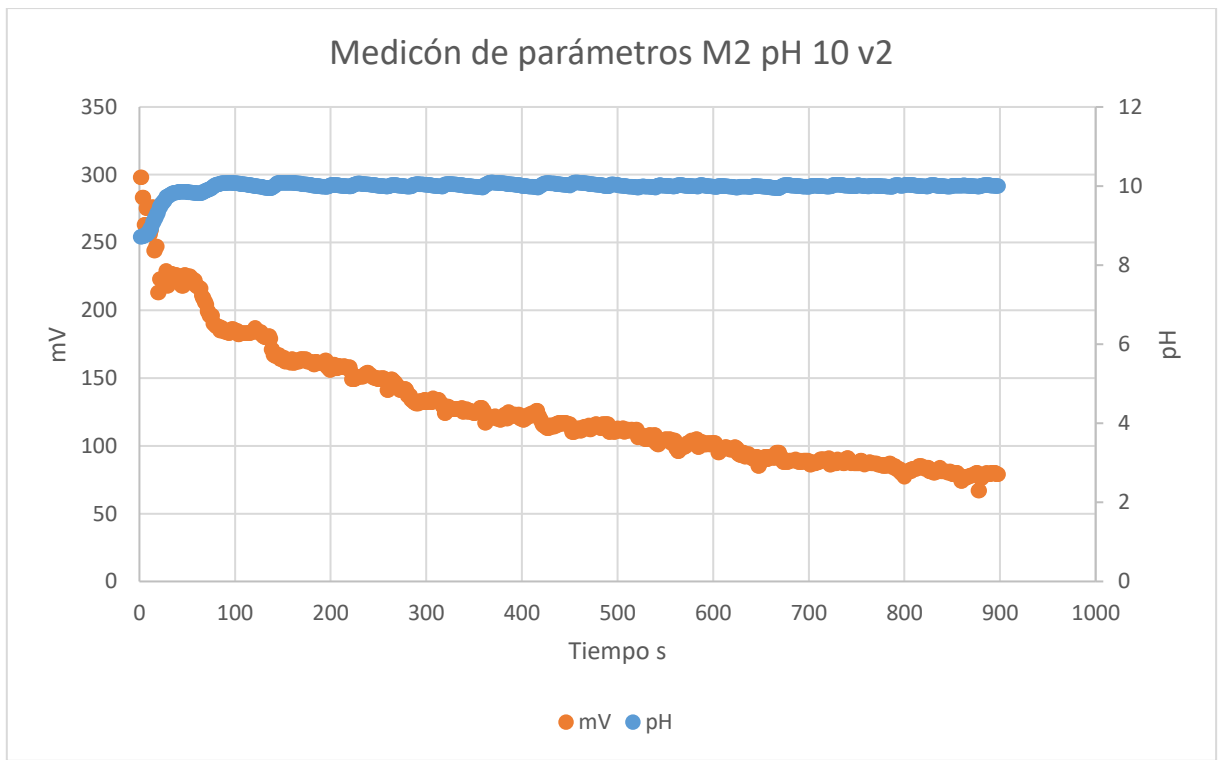


Figura 114 Medición parámetros M2 pH 10 v2

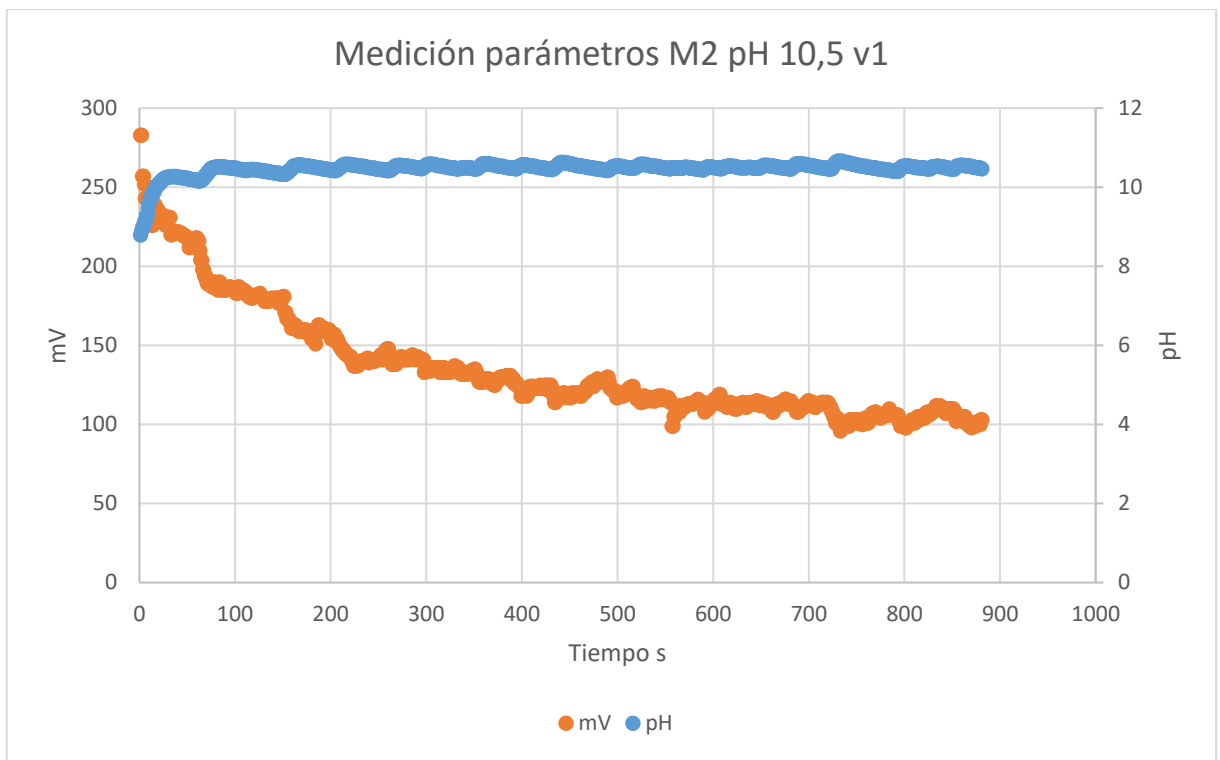


Figura 115 Medición parámetros M2 pH 10,5 v1

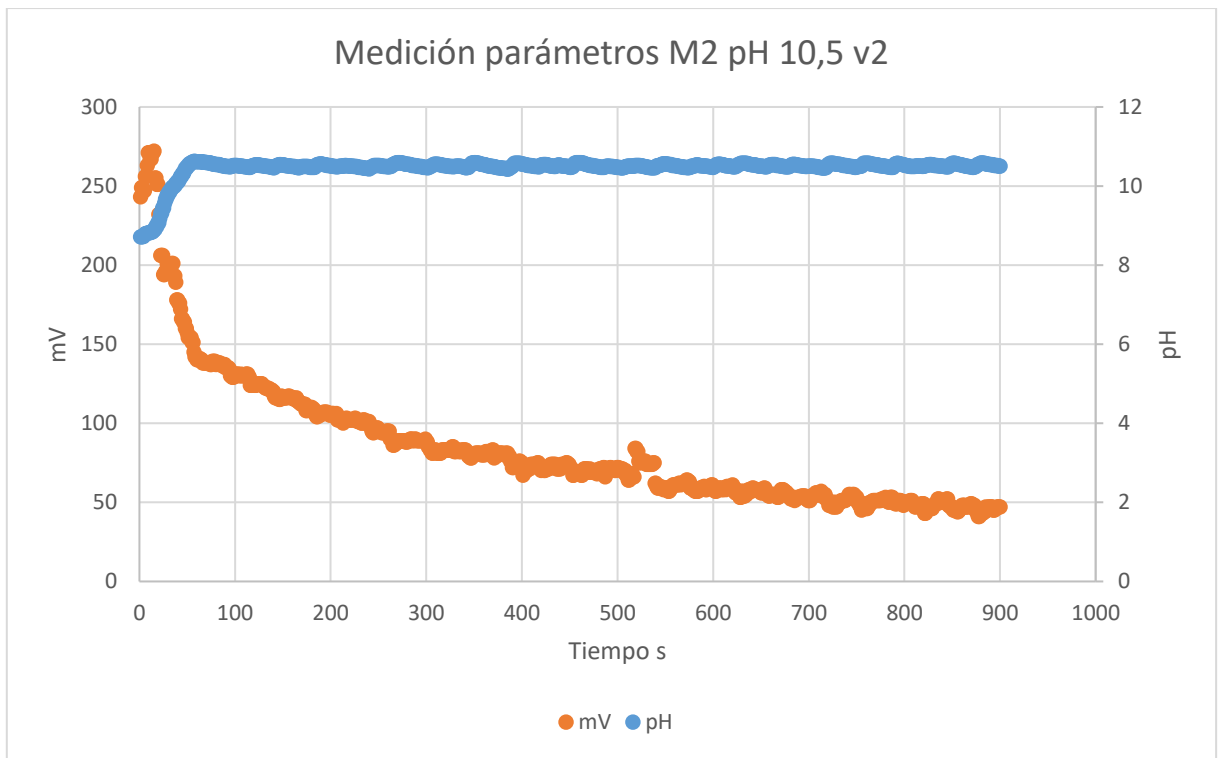


Figura 116 Medición parámetros M2 pH 10,5 v2

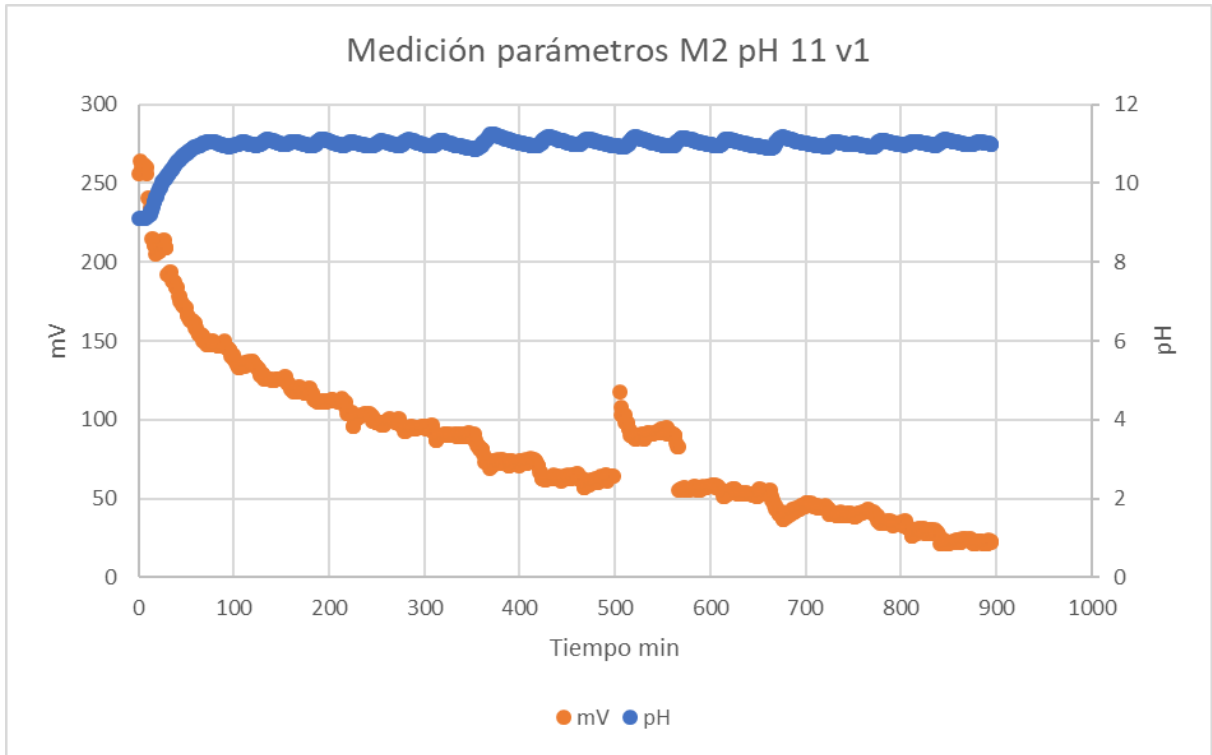


Figura 117 Medición parámetros M2 pH 11 v1

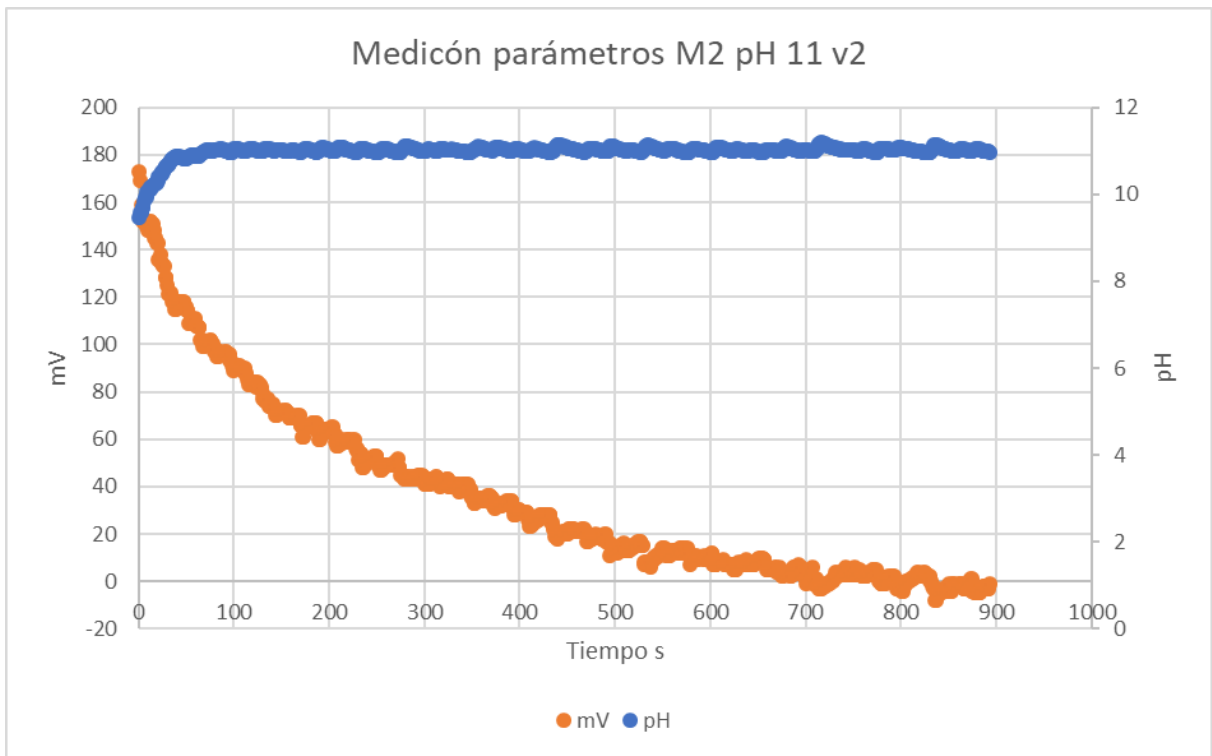


Figura 118 Medición parámetros M2 pH 11 v2

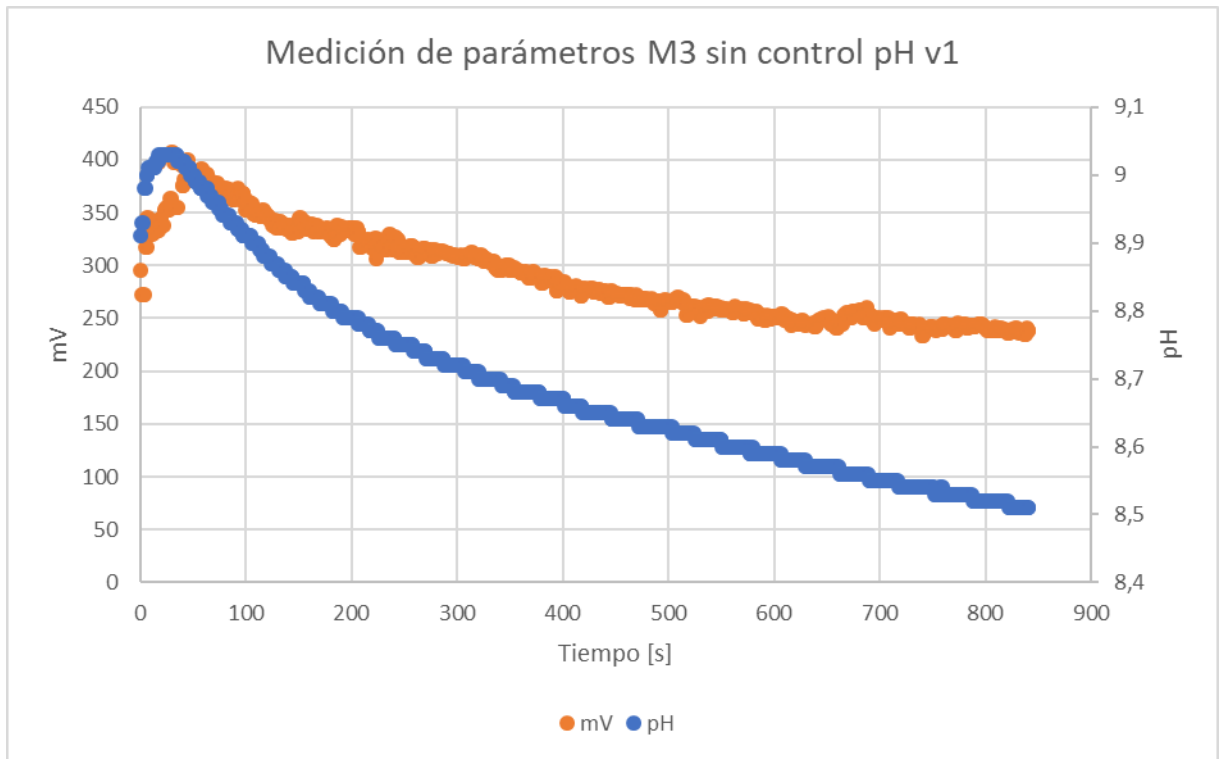


Figura 119 Medición parámetros M3 sin control pH v1

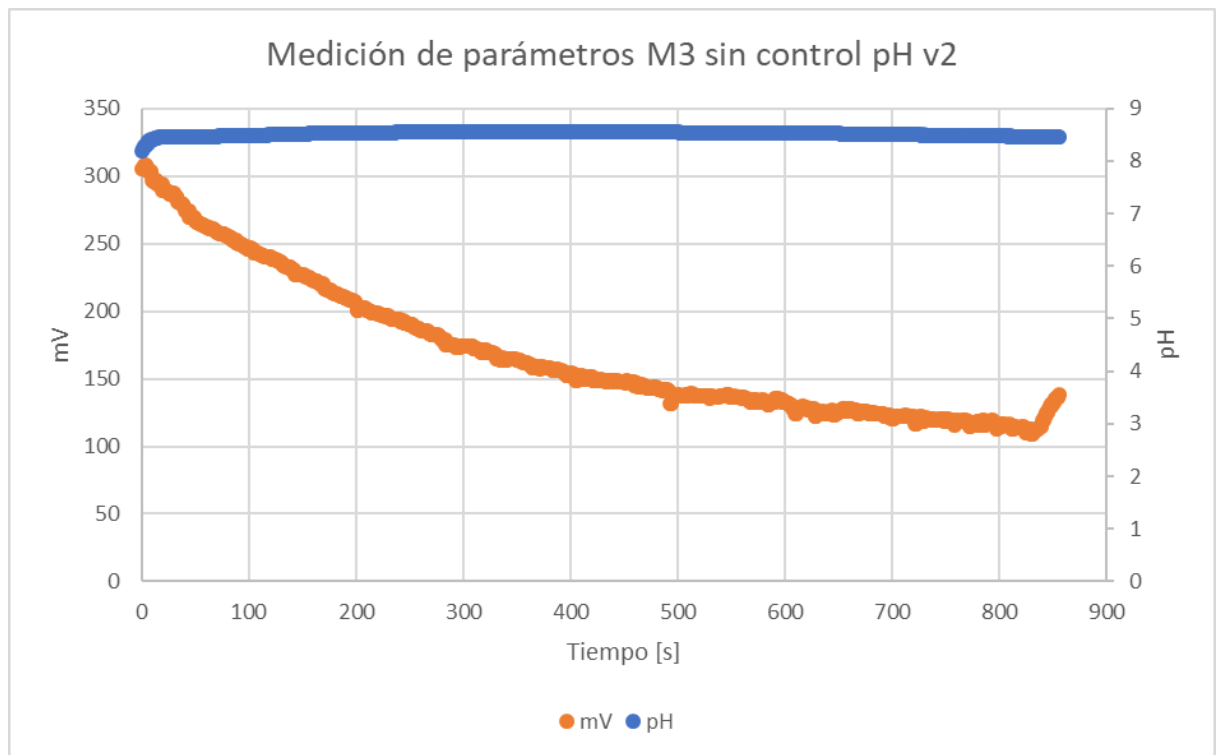


Figura 120 Medición parámetros M3 sin control pH v2

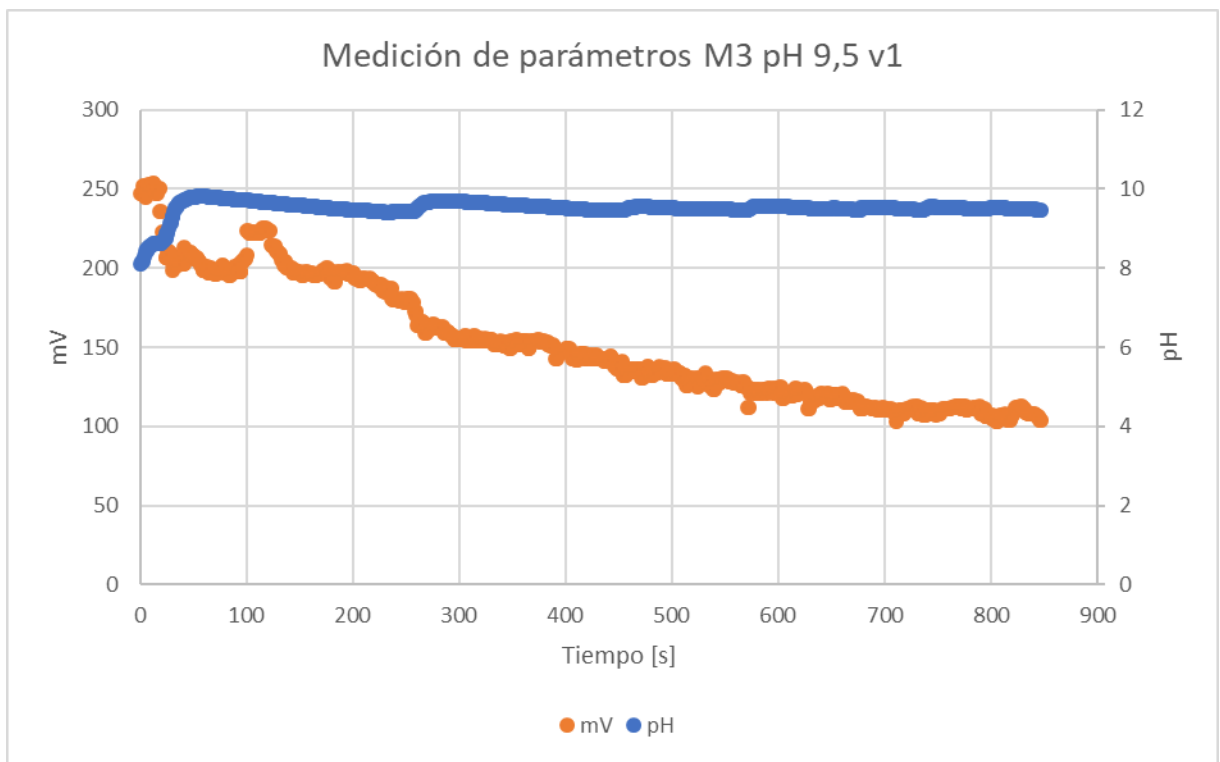


Figura 121 Medición parámetros M3 pH 9,5 v1

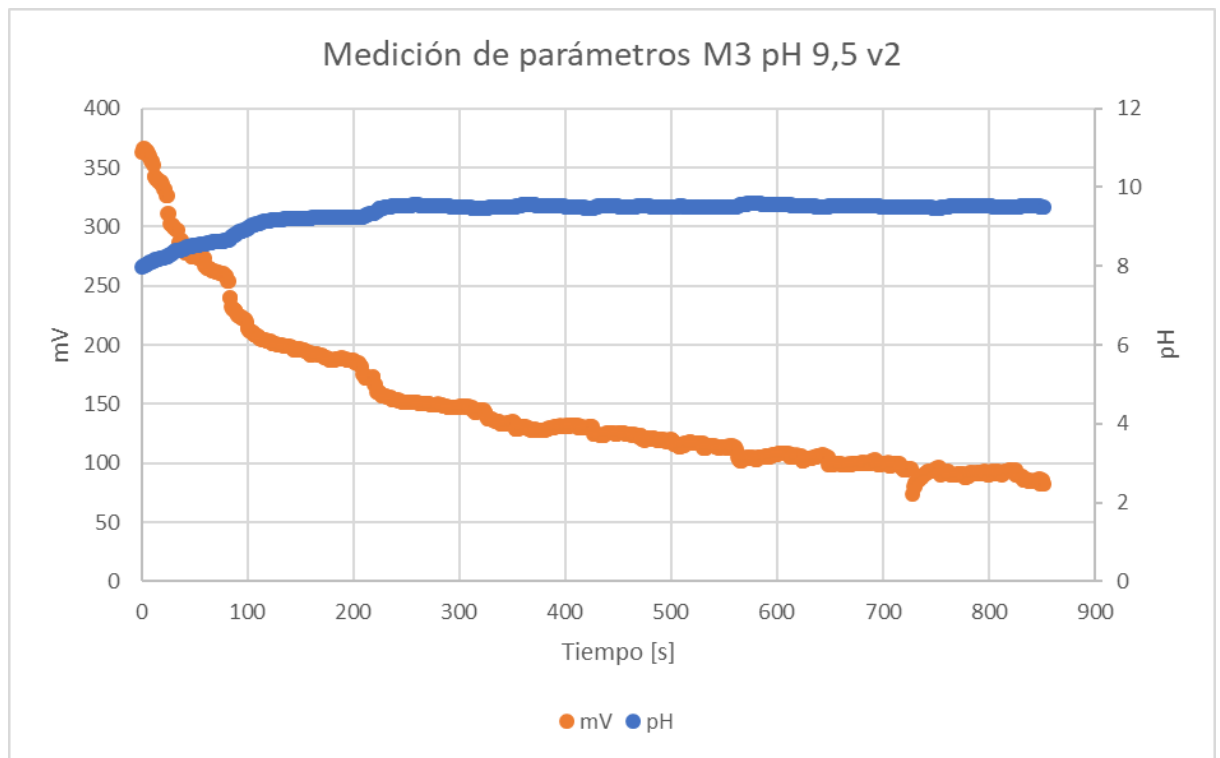


Figura 122 Medición parámetros M3 pH 9,5 v2

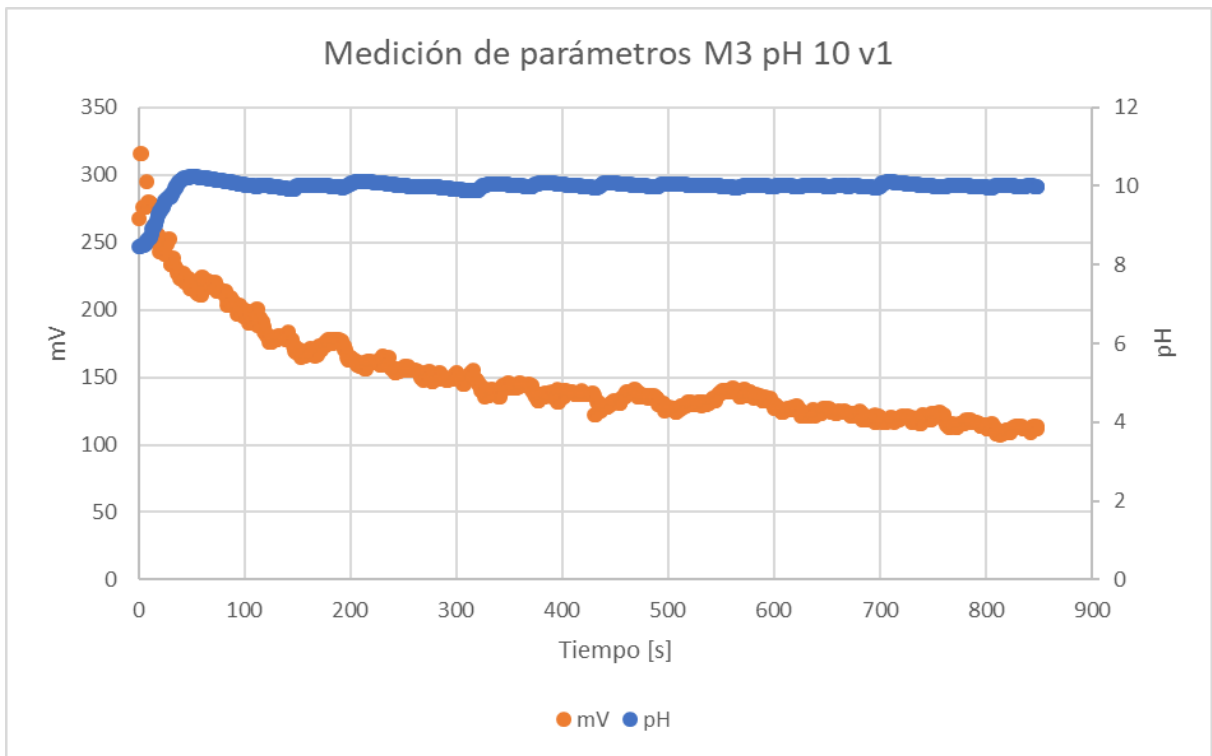


Figura 123 Medición parámetros M3 pH 10 v1

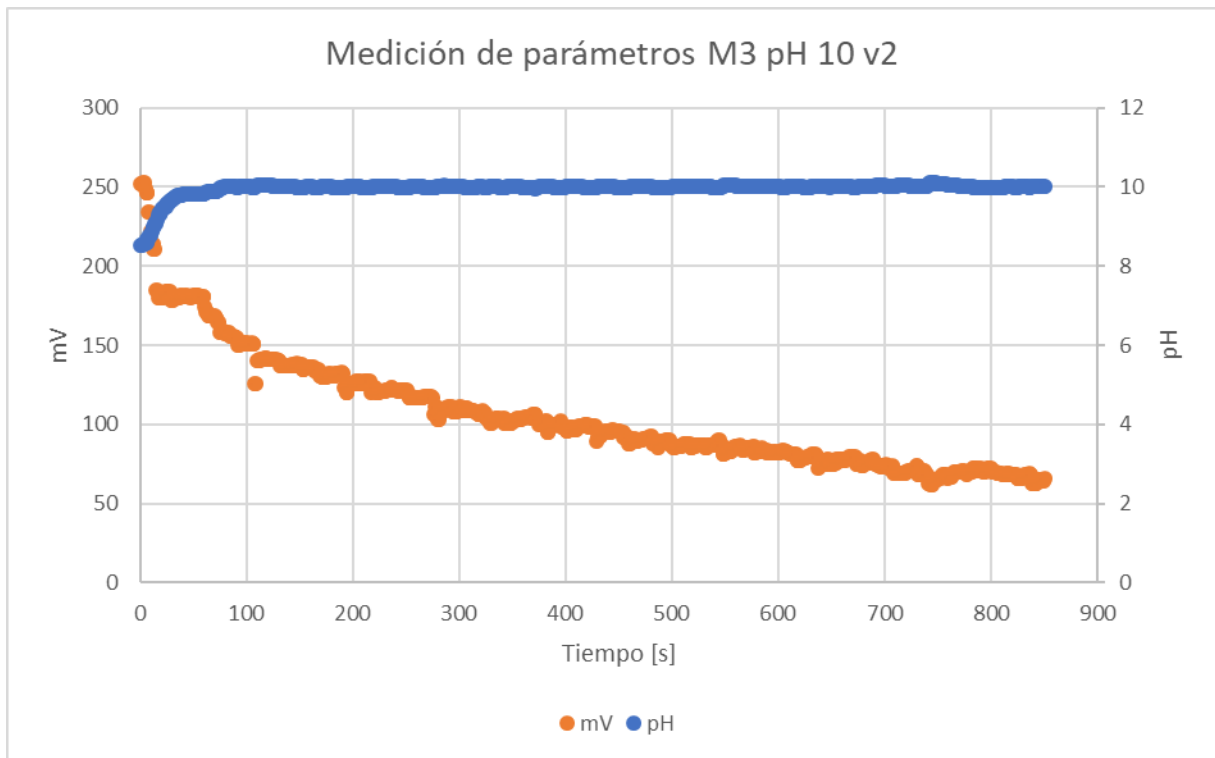


Figura 124 Medición parámetros M3 pH 10 v2

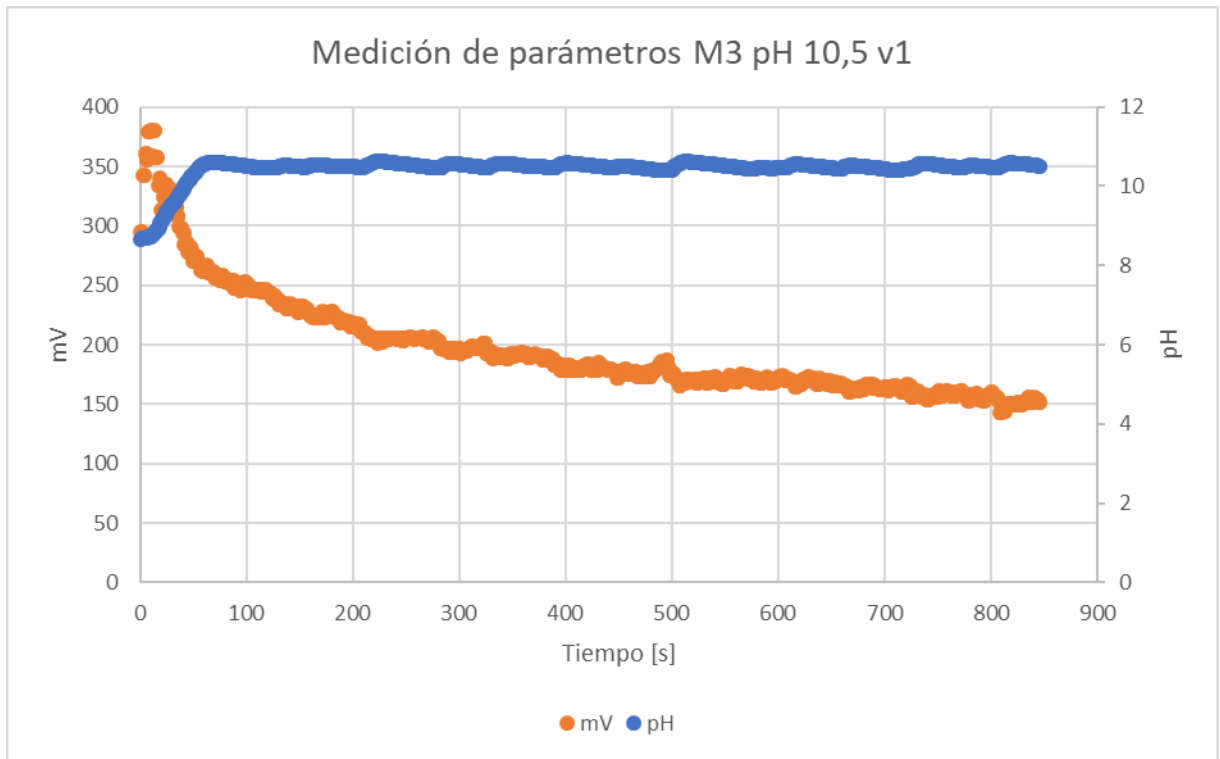


Figura 125 Medición parámetros M3 pH 10,5 v1

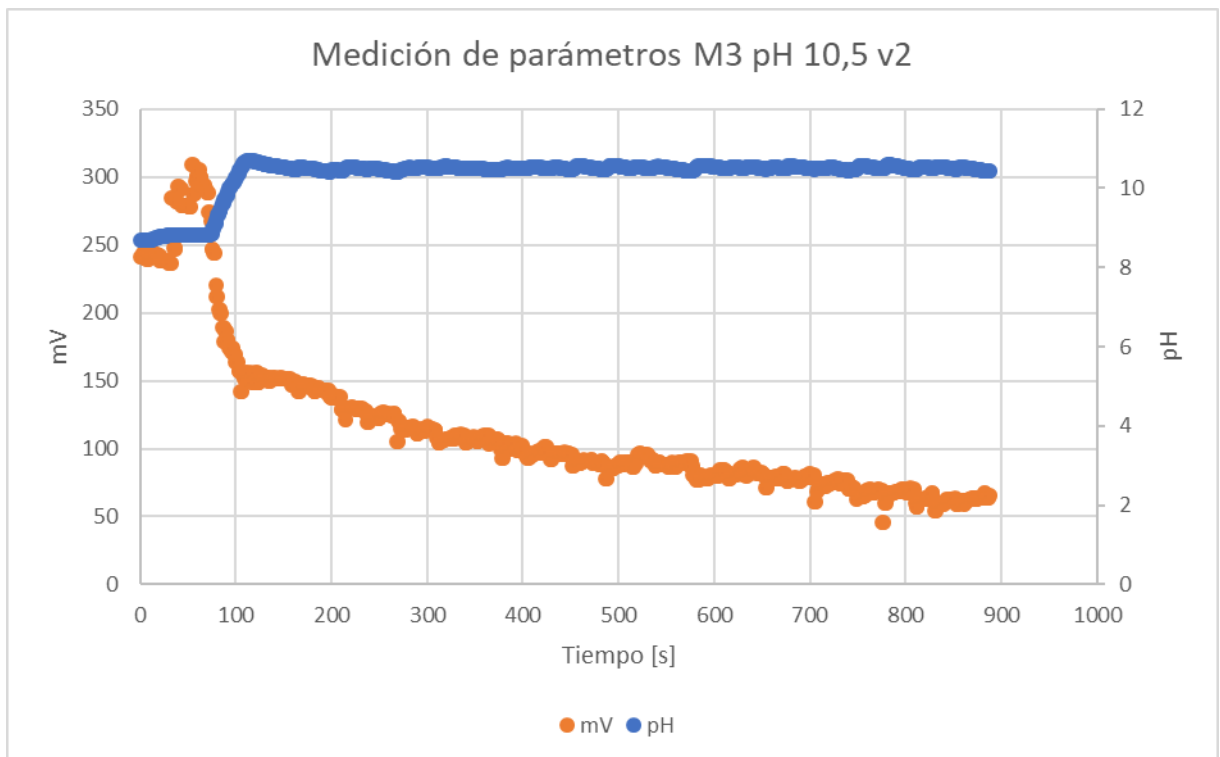


Figura 126 Medición parámetros M3 pH 10,5 v2

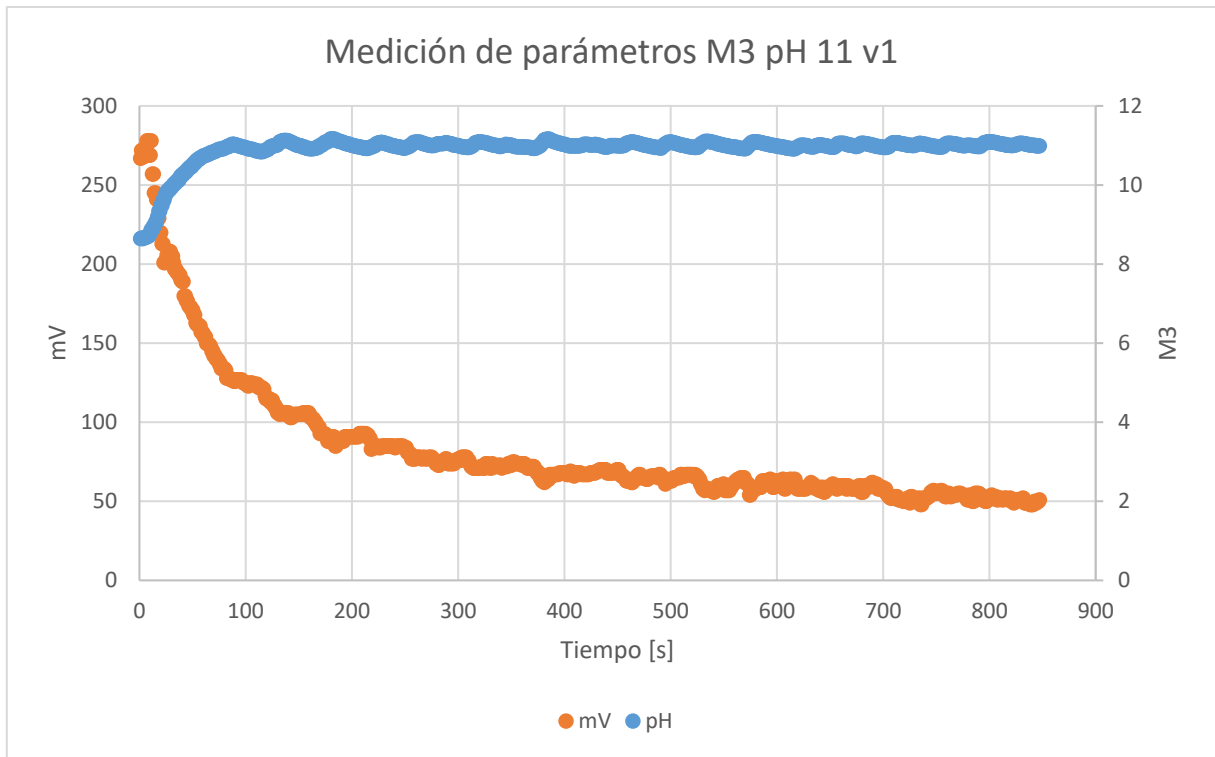


Figura 127 Medición parámetros M3 pH 11 v1

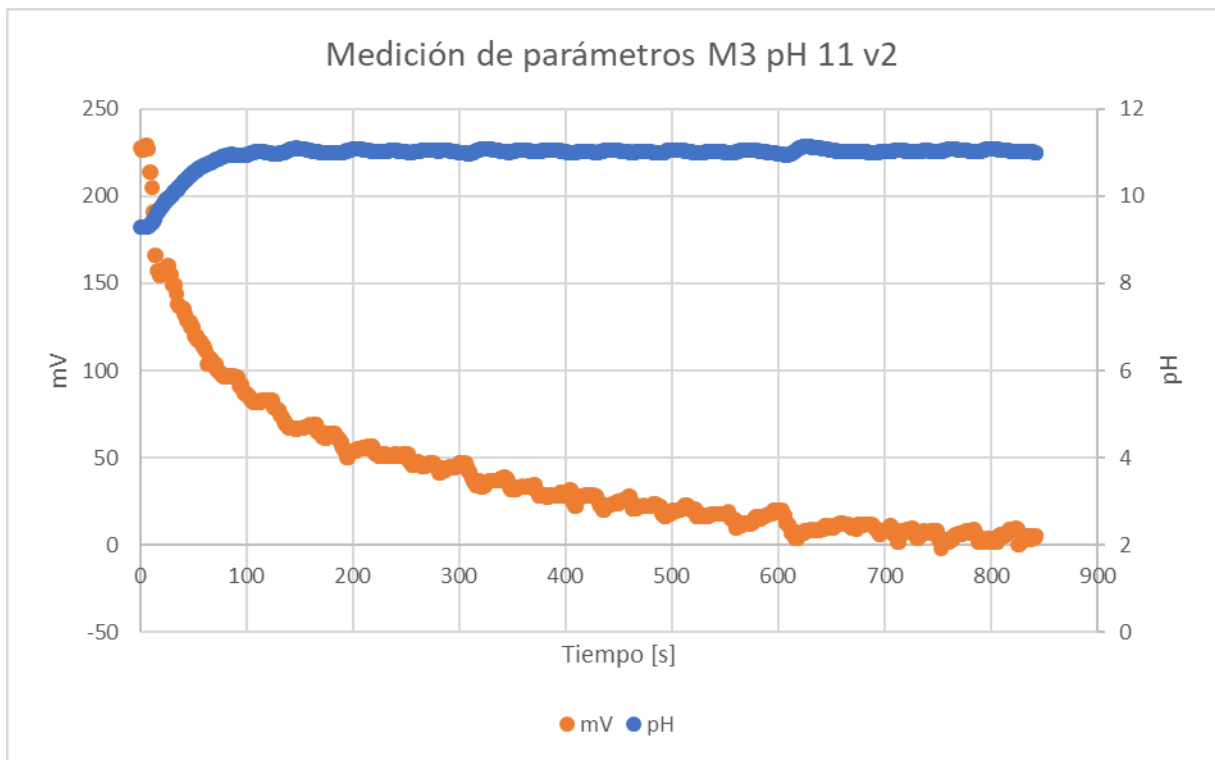


Figura 128 Medición parámetros M3 pH 11 v2

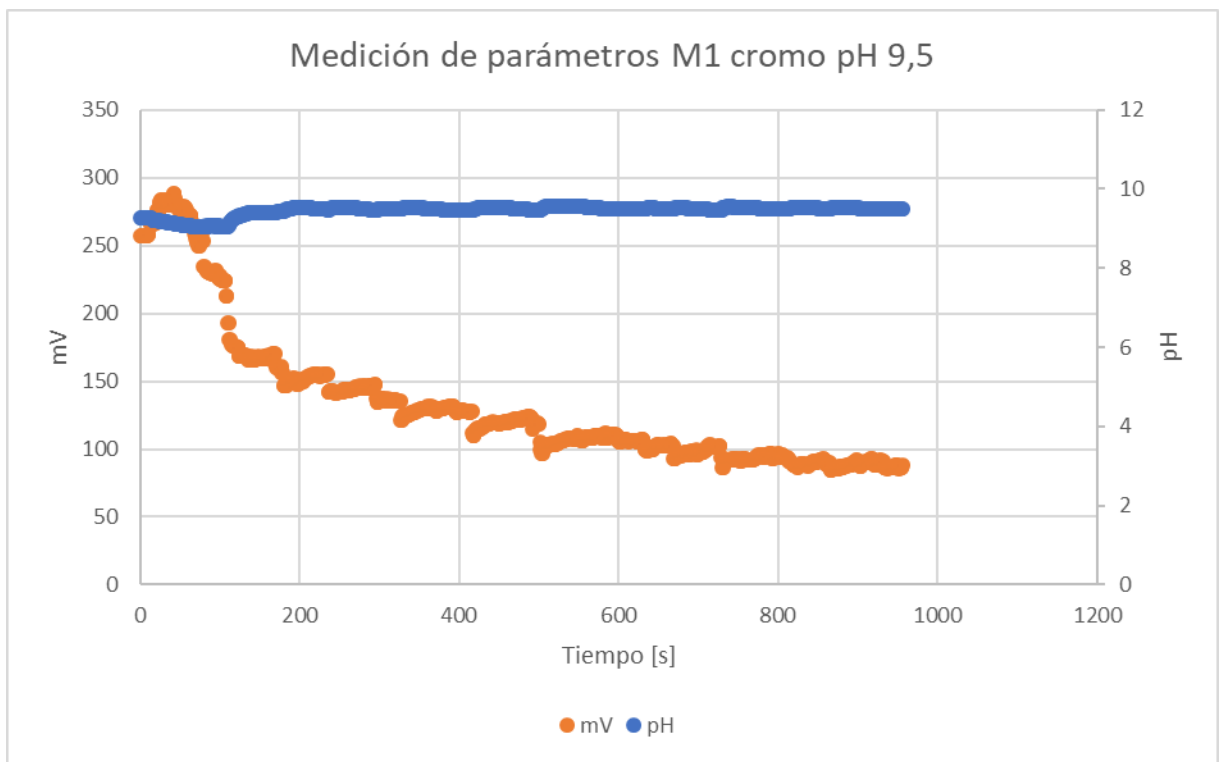


Figura 129 Medición parámetros M1 medios cromados pH 9,5

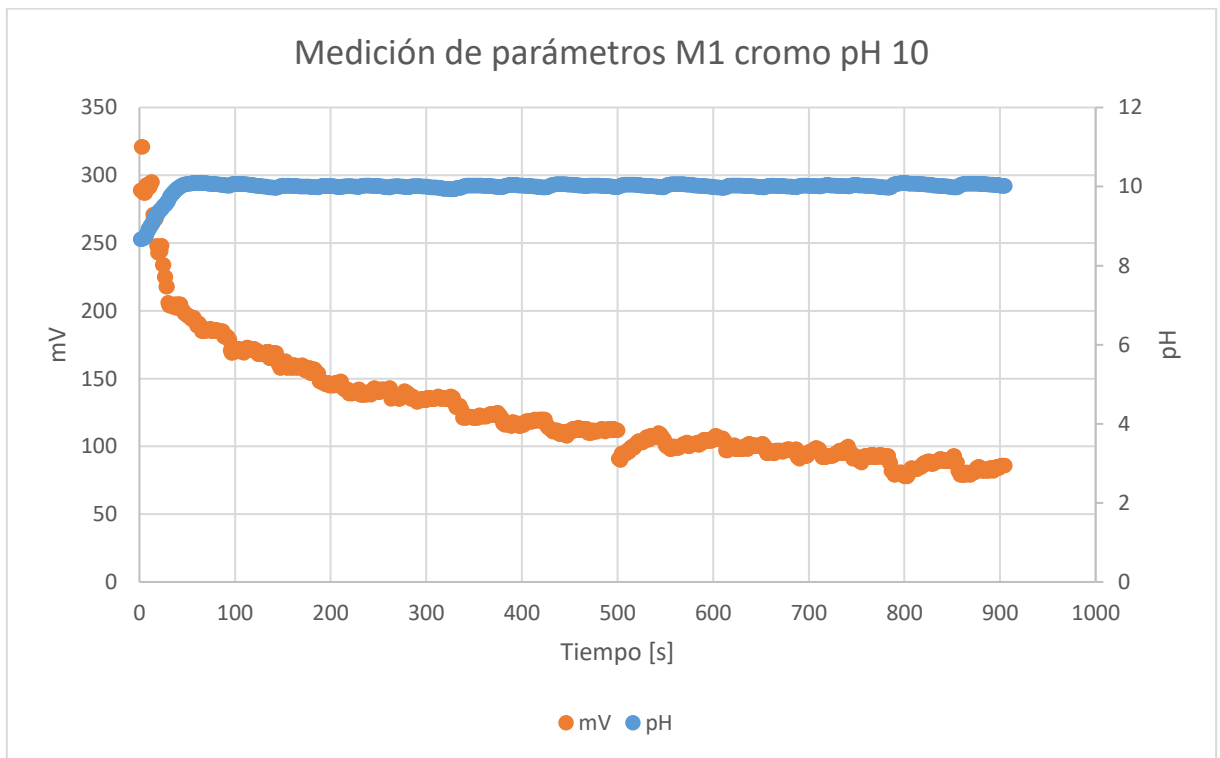


Figura 130 Medición parámetros M1 medios cromados pH 10

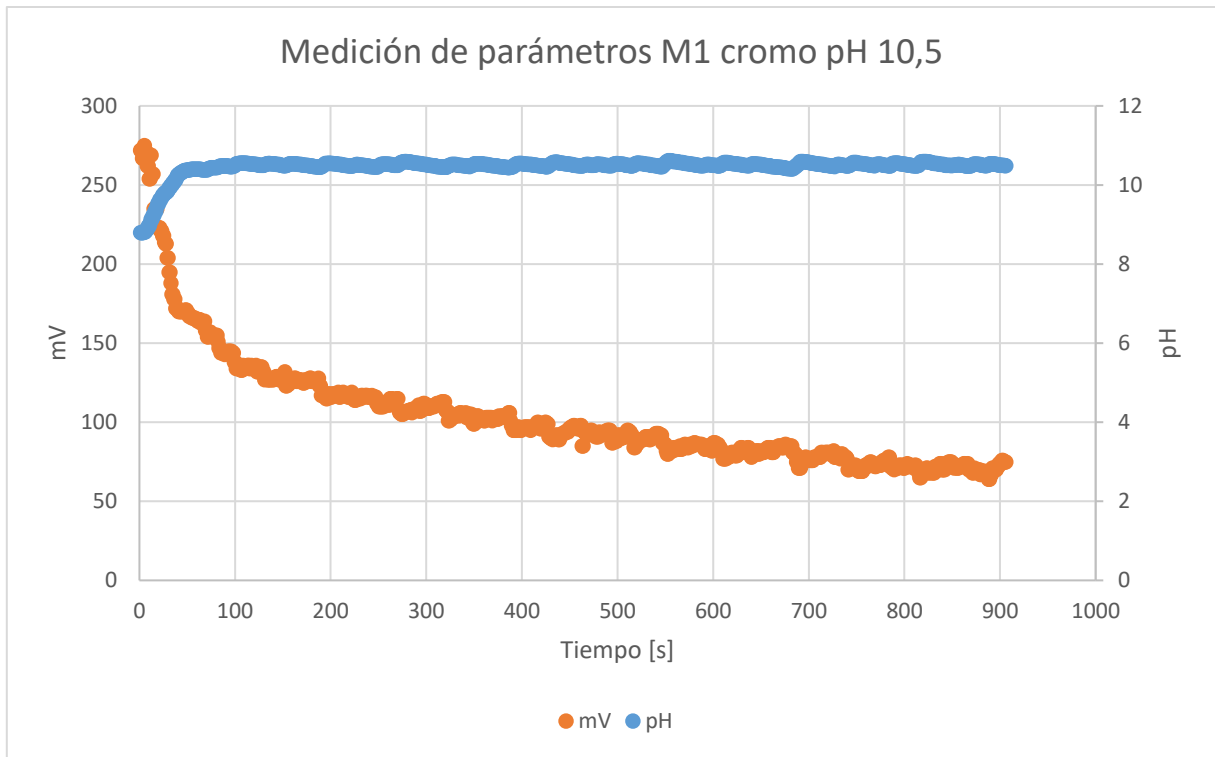


Figura 131 Medición parámetros M1 medios cromados pH 10,5

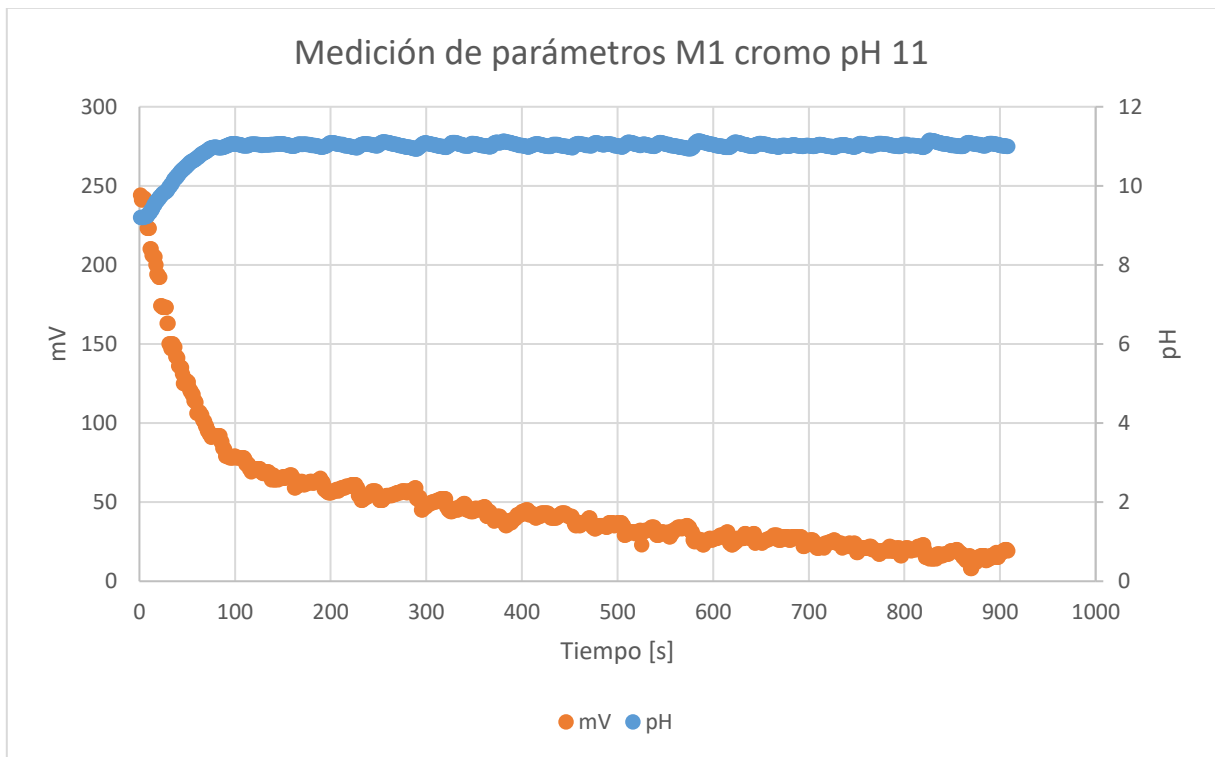


Figura 132 Medición parámetros M1 medios cromados pH 11

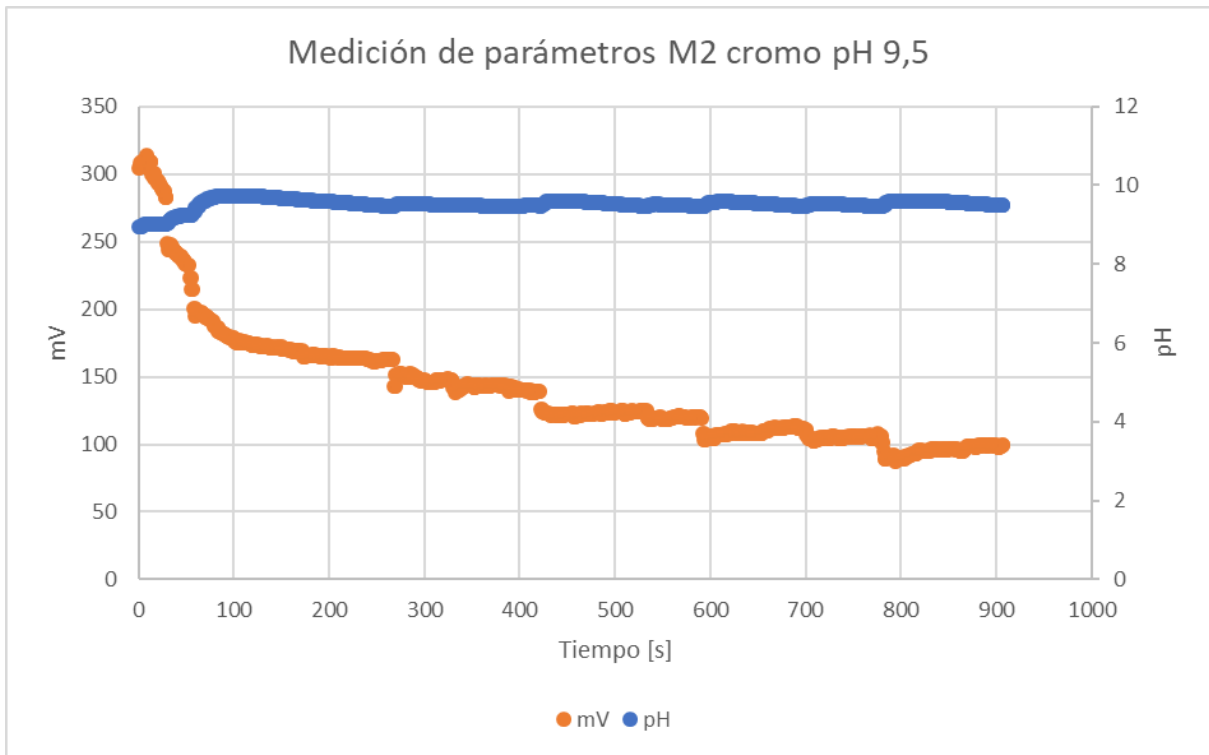


Figura 133 Medición parámetros M2 medios cromados pH 9,5

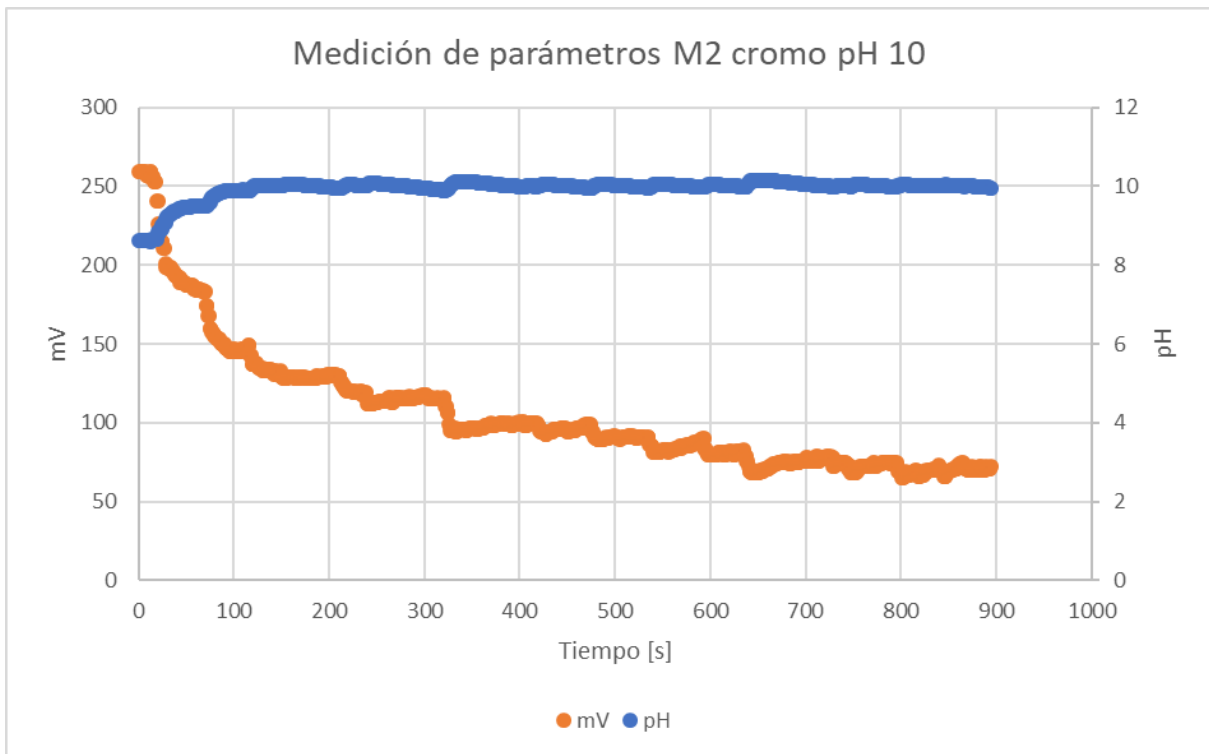


Figura 134 Medición parámetros M2 medios cromados pH 10

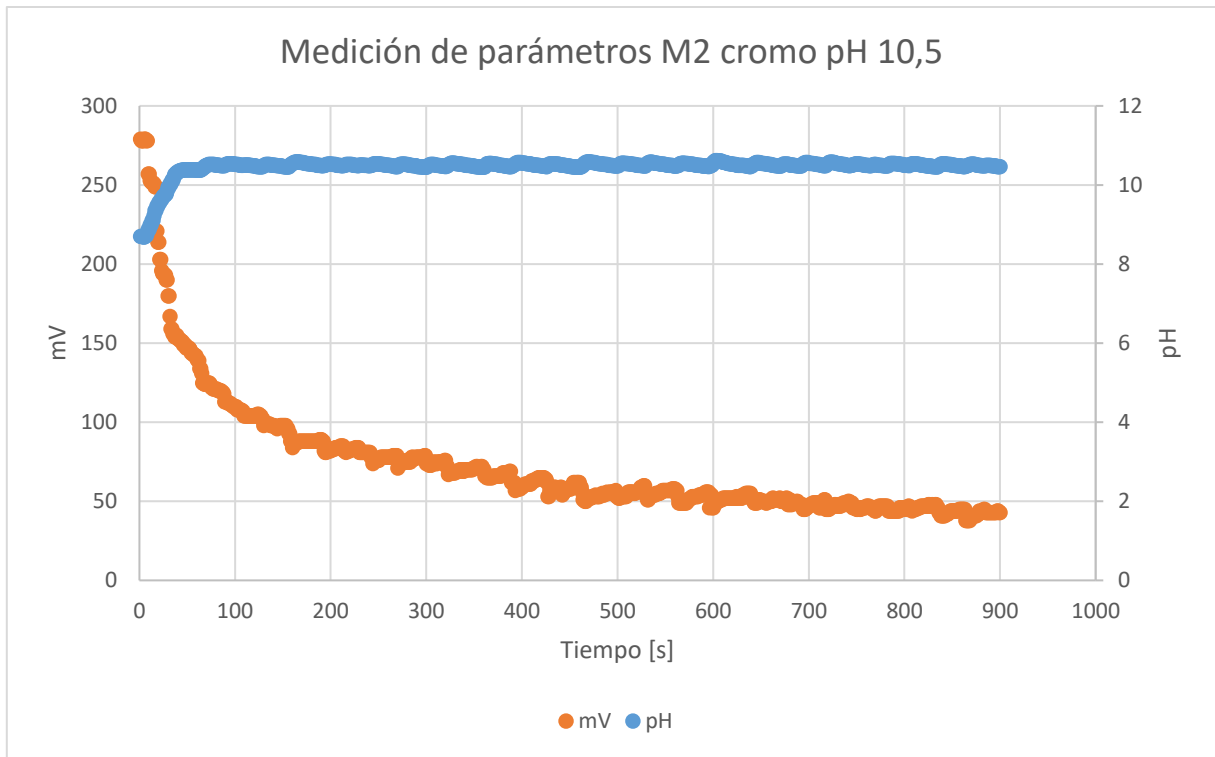


Figura 135 Medición parámetros M2 medios cromados pH 10,5

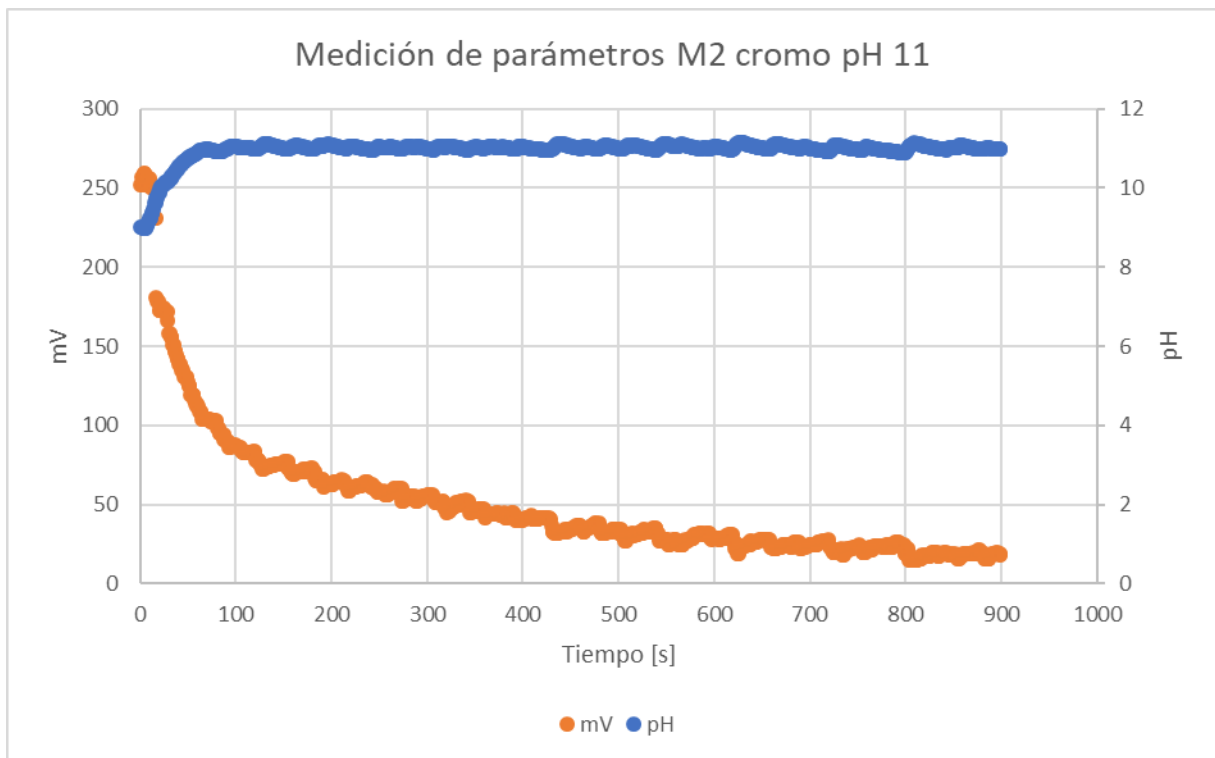


Figura 136 Medición parámetros M2 medios cromados pH 11

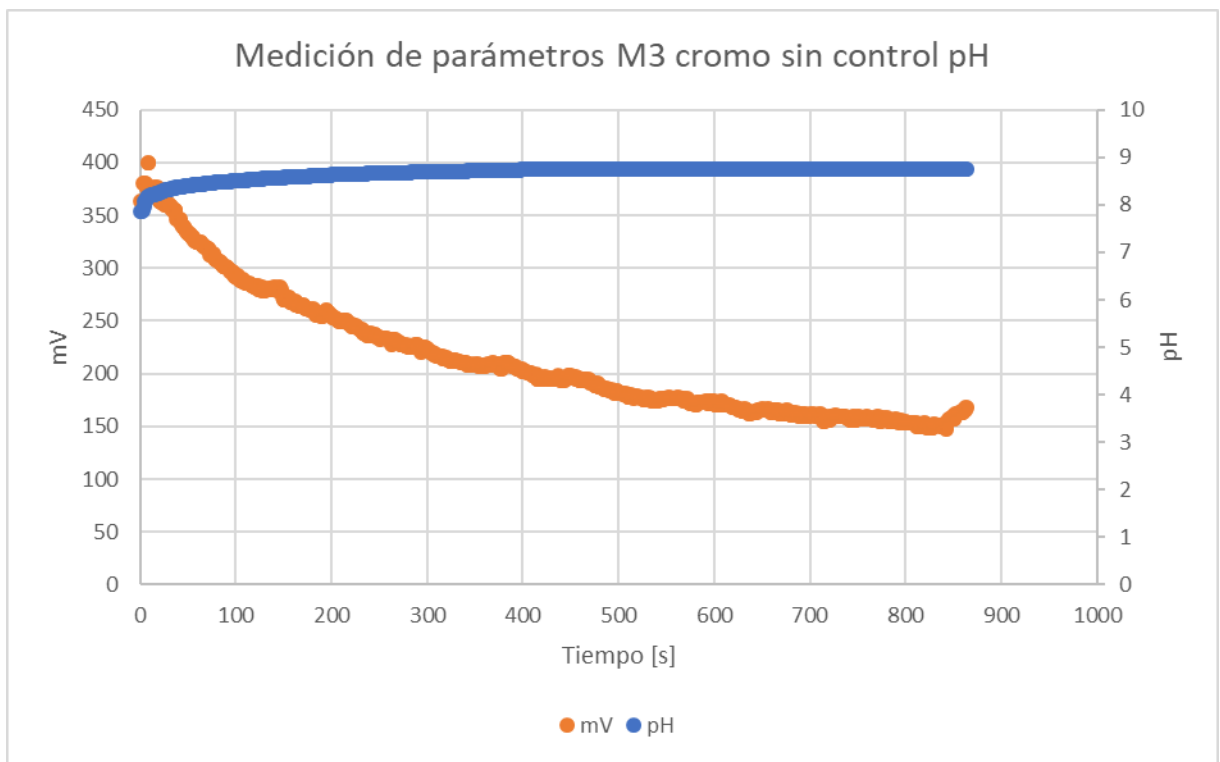


Figura 137 Medición parámetros M3 medios cromados sin control pH

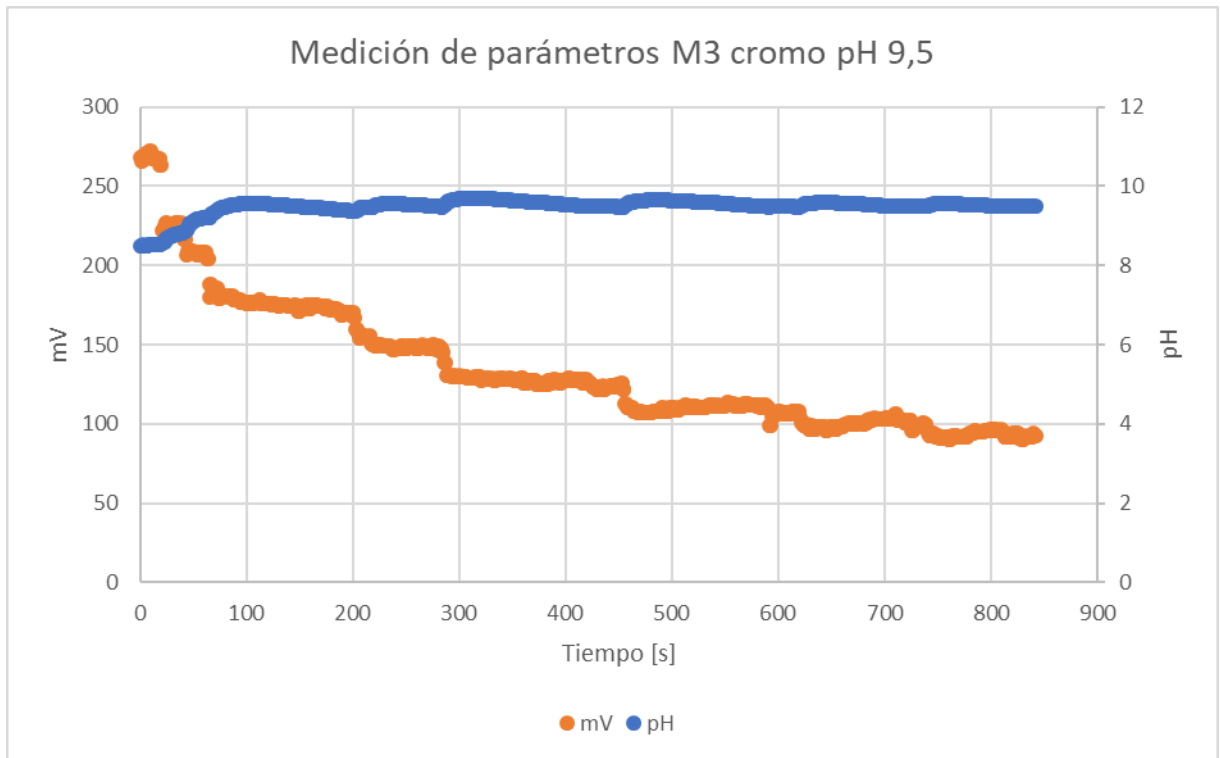


Figura 138 Medición parámetros M3 medios cromados pH 9,5

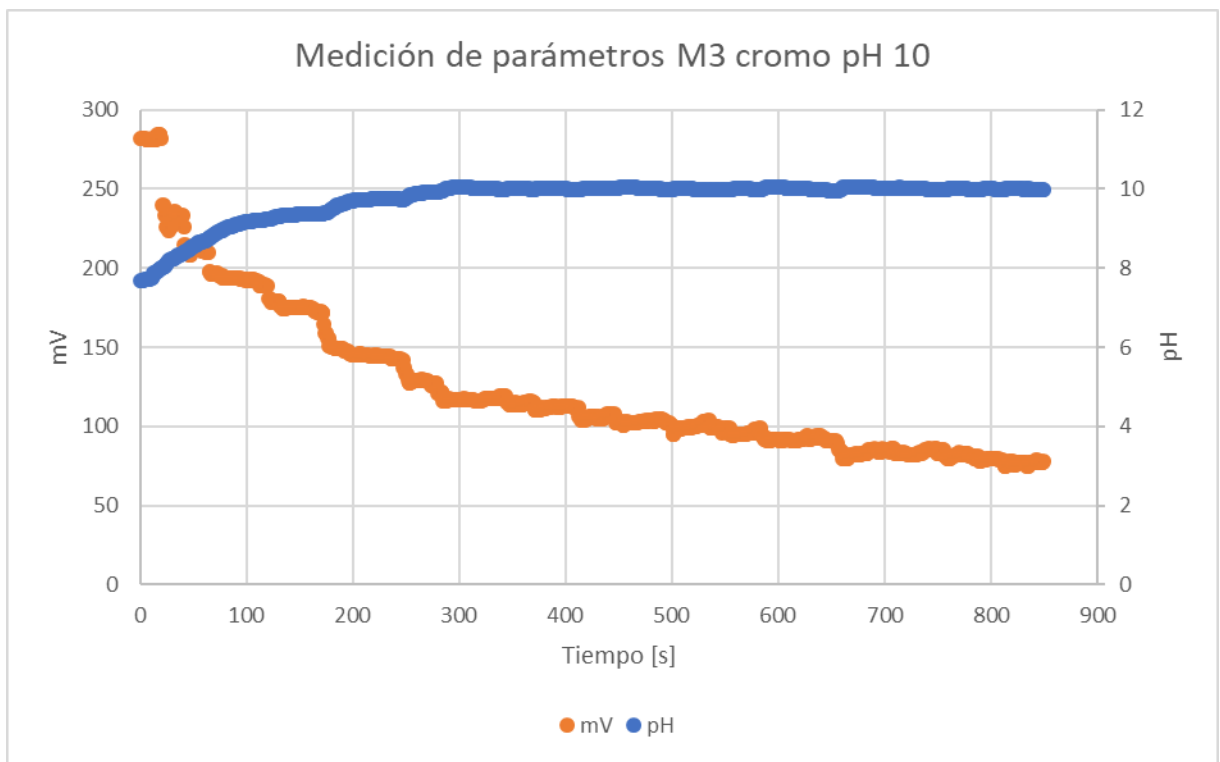


Figura 139 Medición parámetros M3 medios cromados pH 10

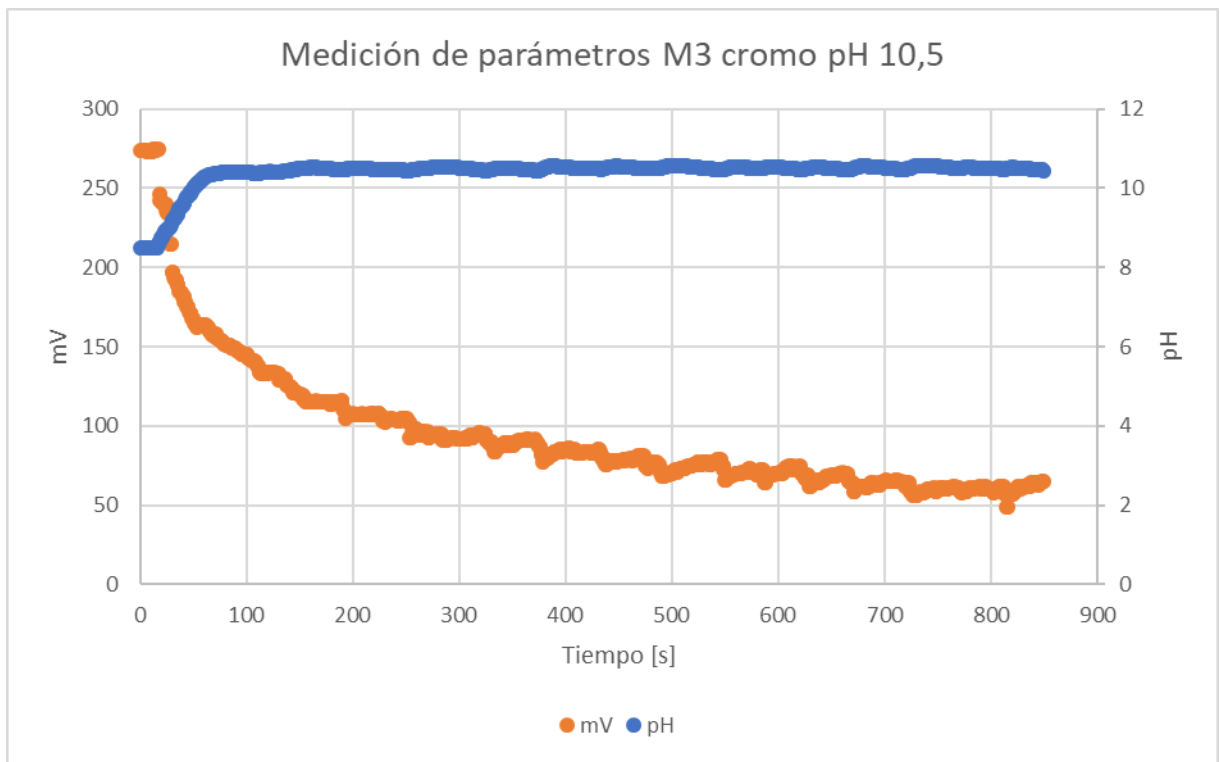


Figura 140 Medición parámetros M3 medios cromados pH 10,5

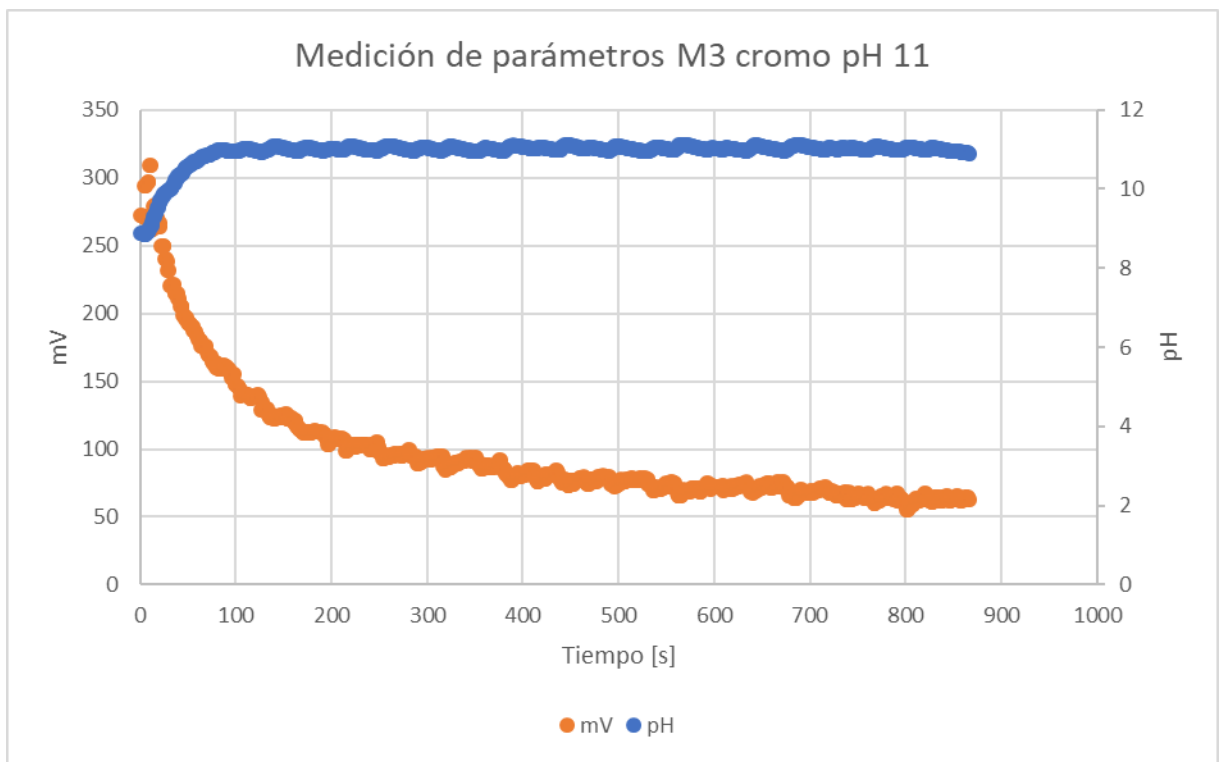


Figura 141 Medición parámetros M3 medios cromados pH 11

8.5 Anexo Análisis de muestras

Luego de llevar las muestras a análisis QEMSCAN se obtiene un barrido de la distribución modal de los principales minerales presente en la roca como se muestra a continuación:

Tabla 62 Resumen presencia minerales QEMSCAN

Minerales	WT [%]		
	M1	M2-RE	M3-RE
Calcopirita	1,098	1,516	0,698
Bornita	0,008	0,002	0,001
Calcocita/Covellita	0,007	0,004	0,001
Otros sulfuros	0,020	0,001	0,001
Óxidos de cobre	0,000	0,000	0,000
Molibdenita	0,035	0,019	0,024
Pirita	0,268	0,016	0,064
Óxidos/hidróxidos de Fe- Ti	1,235	0,890	1,415
Silicatos duros	82,796	87,734	84,954
Filosilicatos	8,358	5,854	7,246
Arcillas total	4,219	1,987	4,455
Arcillas: Caolinita 1A	2,230	1,130	2,580
Arcillas: Illita	0,790	0,340	0,000
Arcillas: Montmorillonita	1,200	0,520	1,880
Carbonatos	1,577	1,629	0,768
Sulfatos	0,059	0,033	0,077
Fosfatos	0,316	0,309	0,293
Otros	0,003	0,01	0,00
Total	100,00	100,00	100,00

En donde los principales metales presentes son los silicatos duros, compuestos por feldespatos y cuarzos. En mayor detalle se presenta:

Tabla 63 Distribución modal minerales QEMSCAN

Minerales	M1	M2	M3
Calcopirita	1,098	1,52	0,698
Bornita	0,008	0,00	0,001
Calcocita/Digenita	0,007	0,00	0,001
Covelita	0,000	0,00	0,000
Enargita/Tennantita	0,000	0,00	0,000
Otros Sufuros	0,020	0,00	0,001
Malaquita/Azurita	0,000	0,00	0,000
Otros óxidos Cu	0,000	0,00	0,000
Molibdenita	0,035	0,02	0,024
Pirita	0,268	0,02	0,064
Óxidos Fe/Hidróxidos	0,560	0,38	0,729
Feldespatos_Albita	22,138	26,53	29,200
Plagioclasa Feldspato	10,987	7,97	9,625
K-Feldspato	21,163	16,47	19,086
Cuarzo	26,470	36,10	26,063
Calcita	1,634	1,61	0,841
Sulfatos	0,059	0,03	0,077
Sericita/Moscovita	4,389	4,67	3,981
Dolomita	0,003	0,02	0,004
Biotita/Flogopita	0,607	0,15	0,215
Clorita	3,361	1,03	3,050
Epidota	1,216	0,22	0,452
Turmalina	0,029	0,01	0,018
Arcillas	4,219	1,99	4,455
Caolinita 1A	2,227	1,131	2,577
Illita	0,791	0,340	0,000
Montmorillonita	1,201	0,517	1,879
Anfíbol (Hornblende)	0,122	0,02	0,033
Tremolita/Actinolita	0,317	0,07	0,053
Zeolita	0,000	0,00	0,000
Pirofilita	0,001	0,00	0,001
Otros silicatos	0,266	0,32	0,271
Apatita	0,316	0,31	0,293
Ti Minerales	0,675	0,51	0,686
Esfeno	0,047	0,03	0,133
Circón	0,043	0,00	0,018
Otros	0,003	0,01	0,002
Total	100,06	100,00	100,08

Además, se presenta la distribución de los materiales que poseen cobre y su respectiva distribución:

Tabla 64 Presencia cobre en unidades geológicas

Mineral	M1	M2	M3
Calcopirita	93,1%	99,2%	96,7%
Bornita	1,1%	0,2%	0,1%
Calcocita/Covelita	0,7%	0,5%	0,1%
Otros sulfuros	0,1%	0,0%	0,0%
Cu Oxides	0,0%	0,0%	0,0%
Fe-Ti óxidos/Hidróxidos	4,3%	0,0%	1,1%
Silicatos duros	0,5%	0,1%	0,1%
Filosilicatos	0,0%	0,0%	0,0%
Arcillas	0,2%	0,0%	1,8%
Total	100%	100%	100%

Dejando claro que el material más presente es la calcopirita, existiendo óxidos e hidróxidos de hierro en menor cantidad en estado natural. Además, se muestra que la calcopirita presenta se encuentra principalmente en estado liberado como se muestra:

Tabla 65 Estado de liberación calcopirita

Masa Calcopirita (PMA)	M1	M2	M3
Calcopirita libre	67,6%	74,2%	54,6%
Calcopirita liberada > 80%	5,2%	3,5%	13,0%
Calcopirita Media > 50%	1,1%	1,1%	20,9%
Calcopirita Sub-Media > 20%	10,9%	13,2%	0,7%
Calcopirita encapsulada	15,2%	8,0%	10,9%
Total	100%	100%	100%

Lo anterior provoca que esta pueda reaccionar más fácilmente con el ambiente. Esto va junto al factor que se encuentra relacionado con feldespatos que poseen baja tasa de reactividad:

Tabla 66 Estado liberación pirita

Mass Pyrite	M1			
	Tamaño			
	X > 150	106 < X ≤ 150	40 < X ≤ 106	X ≤ 40
Pirita libre	0,0	0,0	93,4	5,0
Pirita liberada > 80%	0,0	0,0	0,0	0,5
Pirita Media > 50%	0,0	0,0	0,0	0,2
Pirita Sub-Media > 20%	0,0	0,0	0,0	0,0
Pirita encapsulada	0,1	0,4	0,1	0,2
Total				100,0

Se presenta finalmente la asociación mineralógica de las unidades geológicas, en donde destaca en M1 que la calcopirita se encuentra relacionado con otros minerales, al igual que la pirita. En el caso de M2 y M3, el comportamiento cambia y se ve que la calcopirita también se relaciona con los silicatos fuertes, pudiendo ser feldespatos o cuarzo. Finalmente, se corrobora que el principal material son los silicatos fuertes:

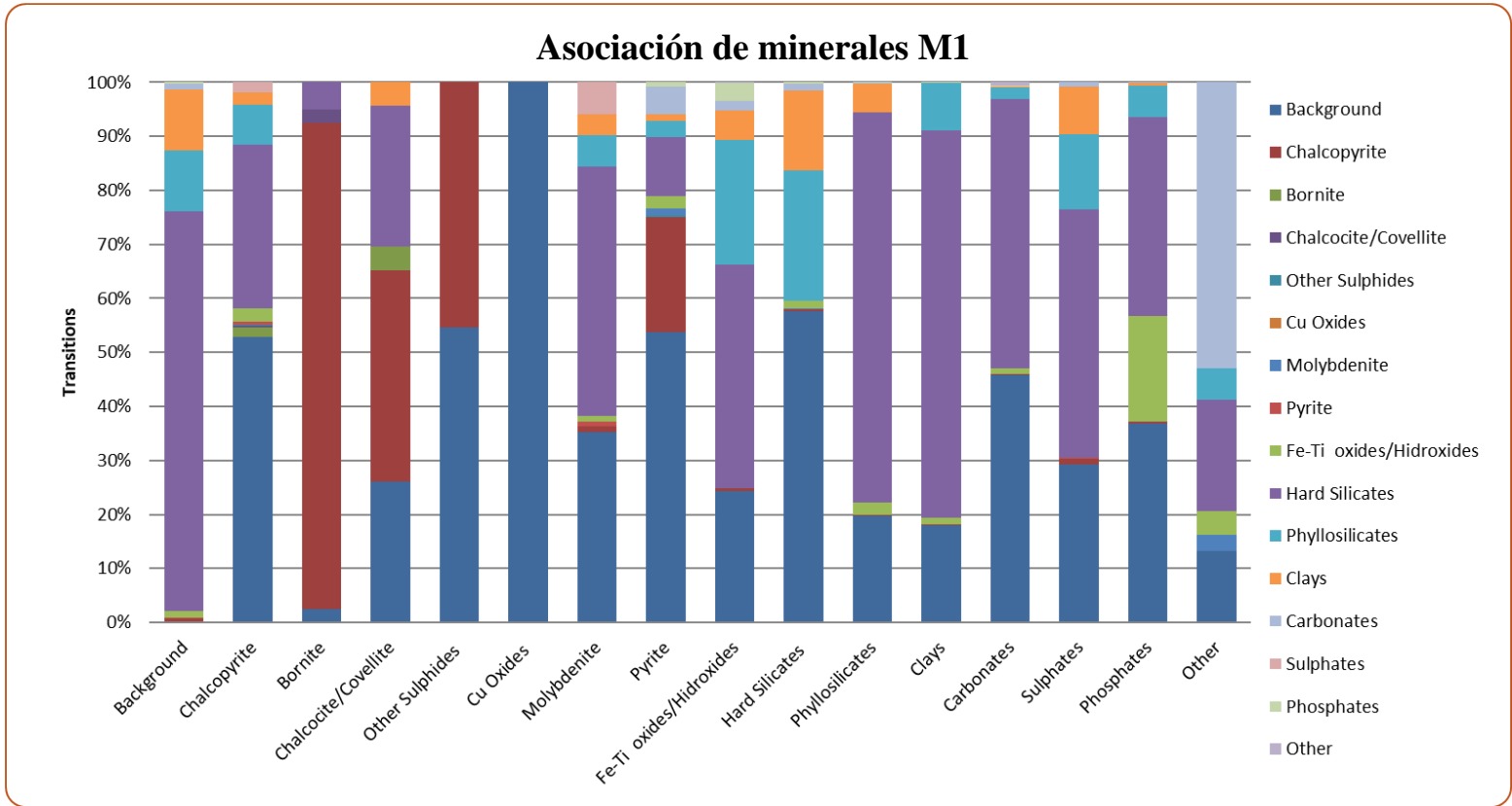


Figura 142 Asociación de minerales M1

Asociación de minerales M2

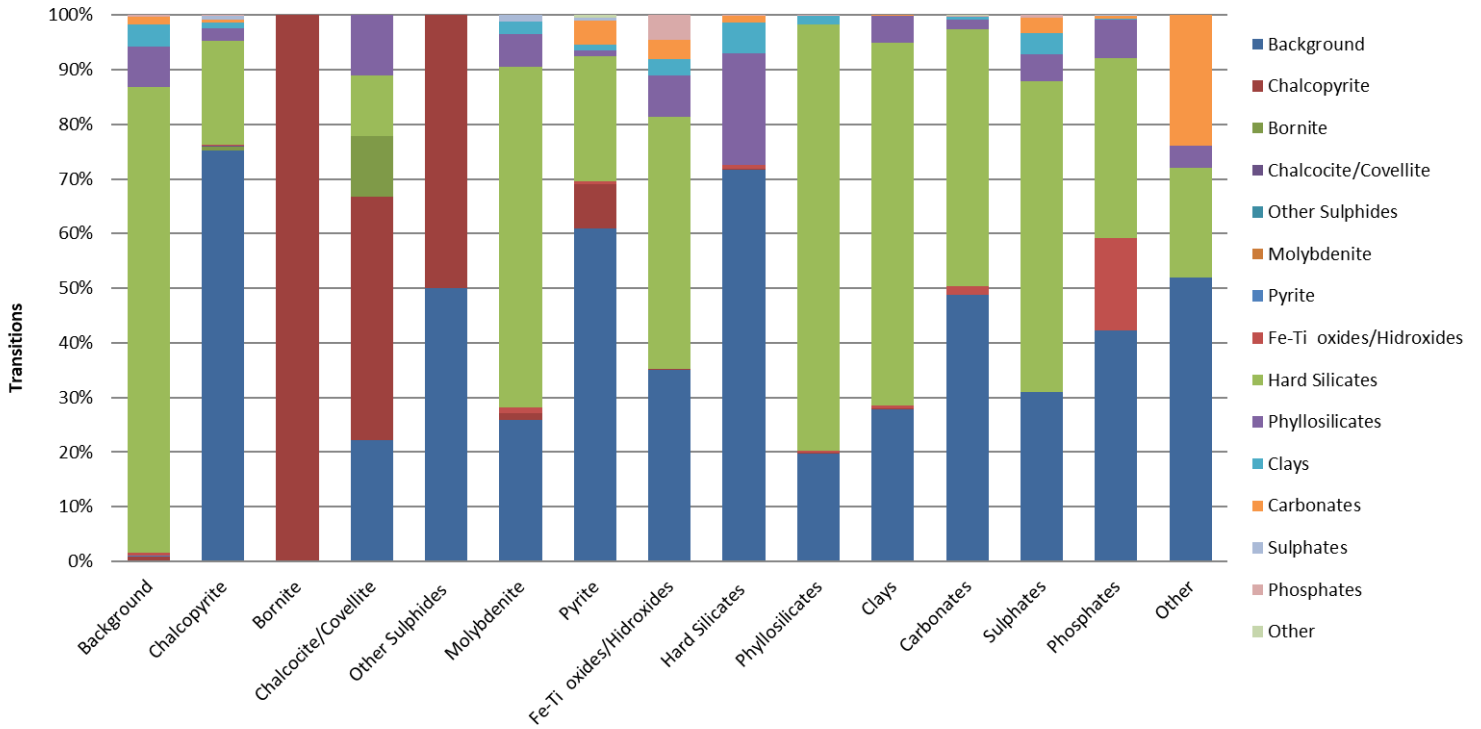


Figura 143 Asociación de minerales M2

Asociación de minerales M1

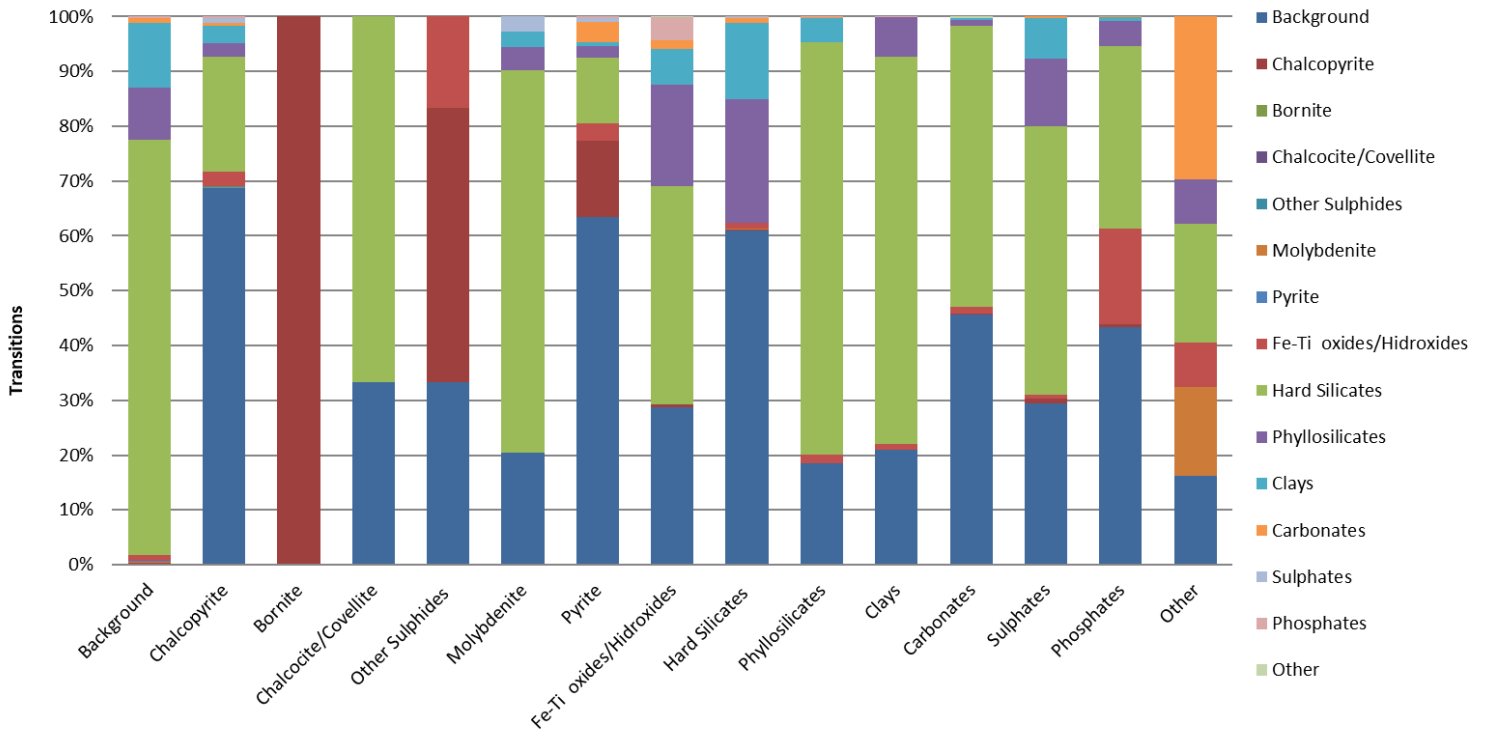


Figura 144 Asociación de minerales M3

Finalmente, la composición de arcillas presentes es:

Tabla 67 Presencia de arcilla en unidad geológica

Especies Minerales	M1	M2	M3
Caolinita 1A	52,78%	56,90%	57,83%
Illita	18,76%	17,09%	0,00%
Montmorillonita	28,46%	26,01%	42,17%
TOTAL ARCILLAS	100,00%	100,00%	100,00%

8.6 Anexo Ajuste lineal

Para la realización del ajuste lineal, se base de la premisa que se busca probar que el área expuesta de partícula está directamente relacionado con el consumo de cal en el tiempo. Para ello, se utilizan los siguientes supuestos:

- Debido a que se busca relacionar el consumo de cal con el área expuesta, no se trabajará con un área exacta, asumiendo así que se trata de partículas esféricas.
- La densidad de partícula es de $2,8 \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right]$ [59].
- El comportamiento de todas las partículas de similar al de la cinética de molienda sin importar su tamaño.
- Se asume que todas las partículas poseen el tamaño del P80, considerando que solo se estudia el comportamiento en el tiempo
- El ajuste numérico solo se puede realizar entre los tiempos en que fue modelada la cinética de molienda.

De esa forma, se comienza calculando el área superficial de partícula. En primer lugar, se estima la cantidad de partículas presente:

Ecuación 6 Obtención número de partículas

$$\text{número de partículas} = \frac{\text{peso muestra}}{\text{densidad} * \text{volumen}} = \frac{\text{peso muestra}}{\text{densidad} * \frac{4}{3} * \pi * r^3}$$

Desarrollando con la ecuación de cinética de molienda de M1 de la Tabla 30 a 8 minutos:

$$\text{número de partículas} = \frac{1500 \text{ [kg]} * \frac{1}{10^6} \left[\frac{\text{ton}}{\text{kg}} \right]}{2,8 \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right] * \left(\frac{1}{10} \right)^{18} \left[\frac{\text{m}^3}{\mu\text{m}^3} \right] * \frac{4}{3} * \pi * 204 \text{ [\mu m]}^3} = 1,54 * 10^7$$

Con el número de partículas, se procede a calcular el área:

Ecuación 7 Área expuesta

$$\text{Área expuesta} = \text{número de partícular} * 4 * \pi * r^2$$

Desarrollando para el mismo caso:

$$\text{Área expuesta} = 1,54 * 10^7 * 4 * \pi * 204 \text{ [\mu m]}^2$$

$$\text{Área expuesta} = 8,13 \text{ [m]}^2$$

Se calcula así el área expuesta para los puntos de midió el consumo de cal, junto a que se adecúe al ajuste de la cinética de molienda. Esto se realiza comparando los puntos de los Anexo Cinética de molienda y Anexo Consumo de cal a través del tiempo. Mostrando a continuación el consumo de cal según el tiempo y su área superficial correspondiente:

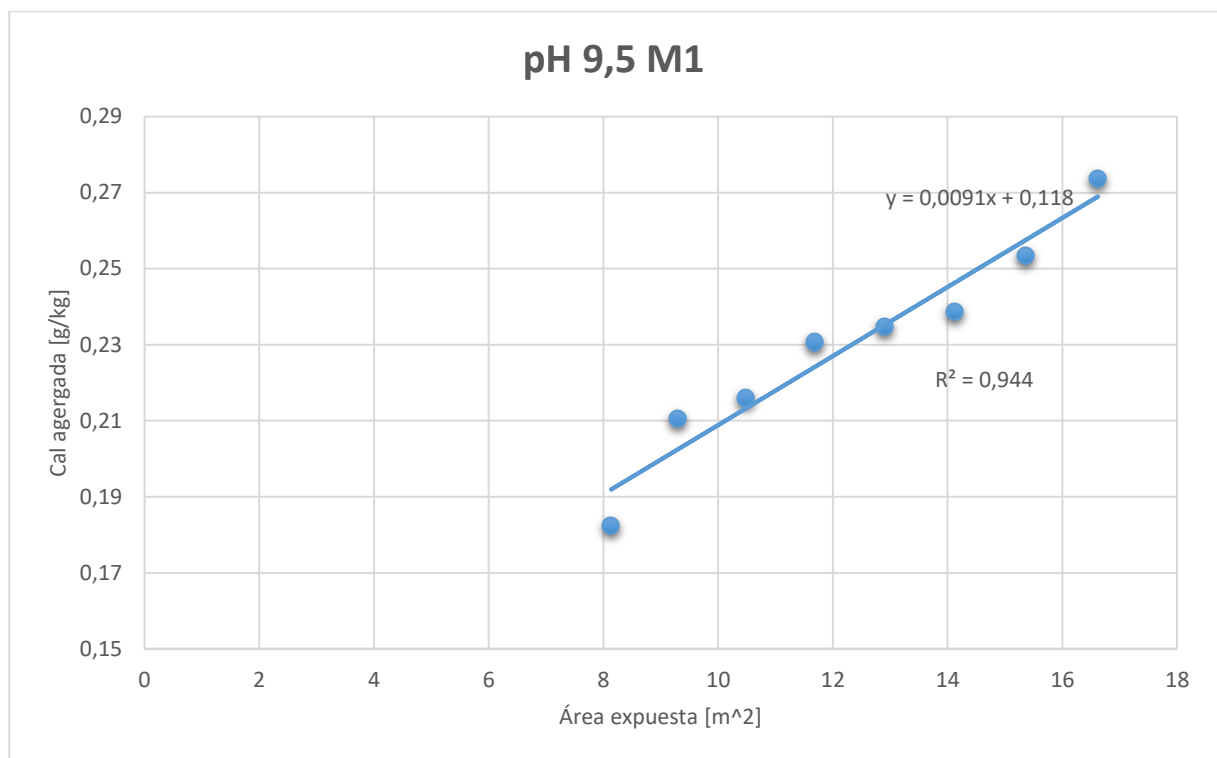


Figura 145 Relación lineal M1 pH 9,5

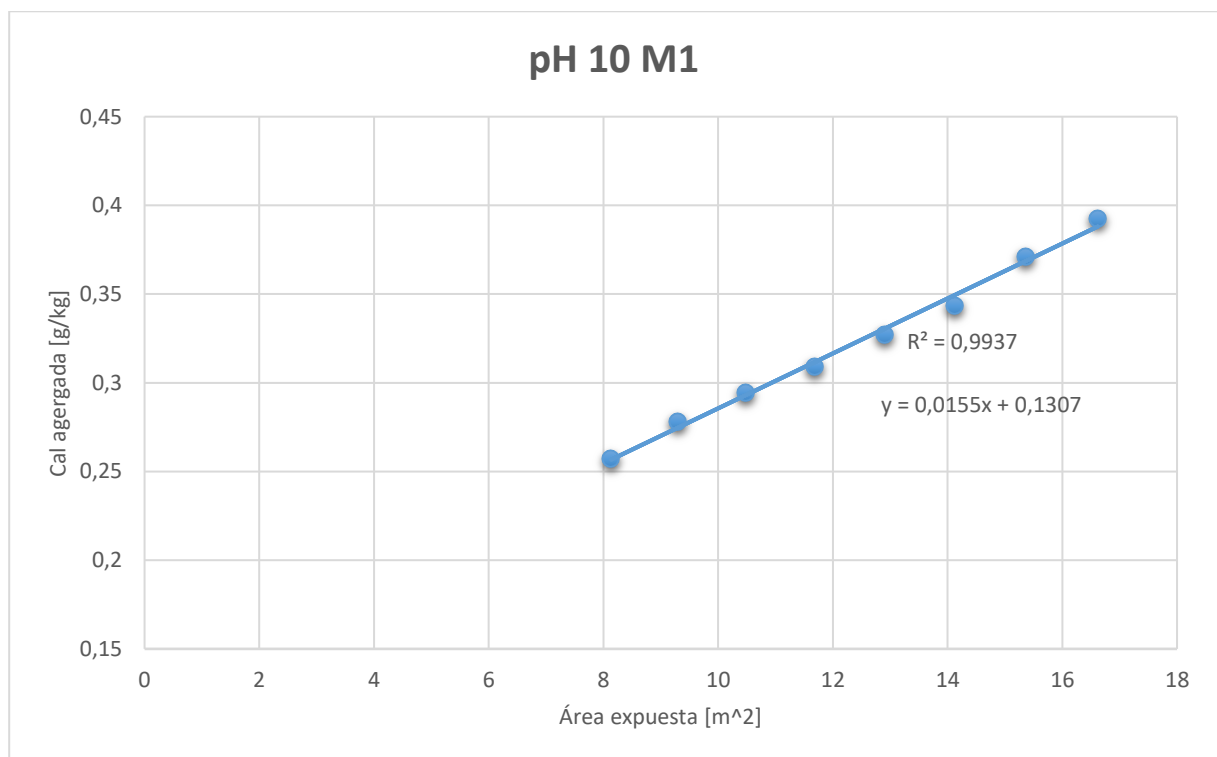


Figura 146 Relación lineal M1 pH 10

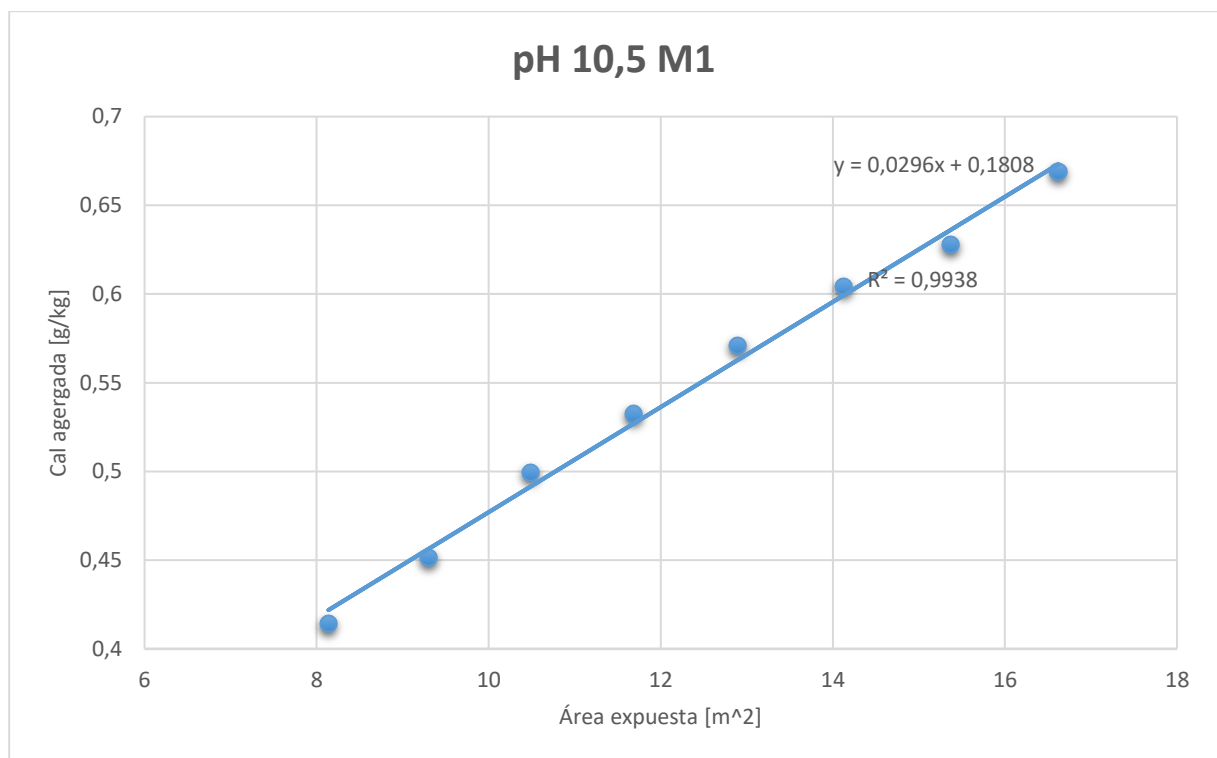


Figura 147 Relación lineal M1 pH 10,5

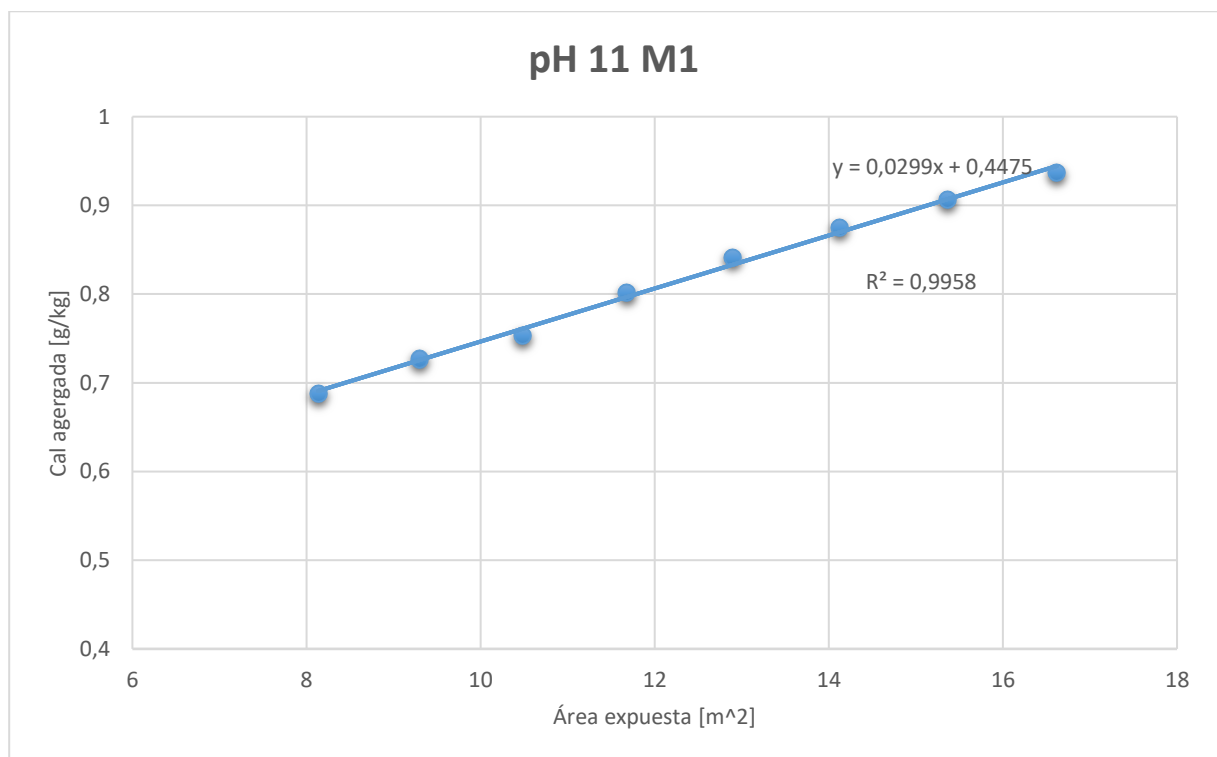


Figura 148 Relación lineal M1 pH 11

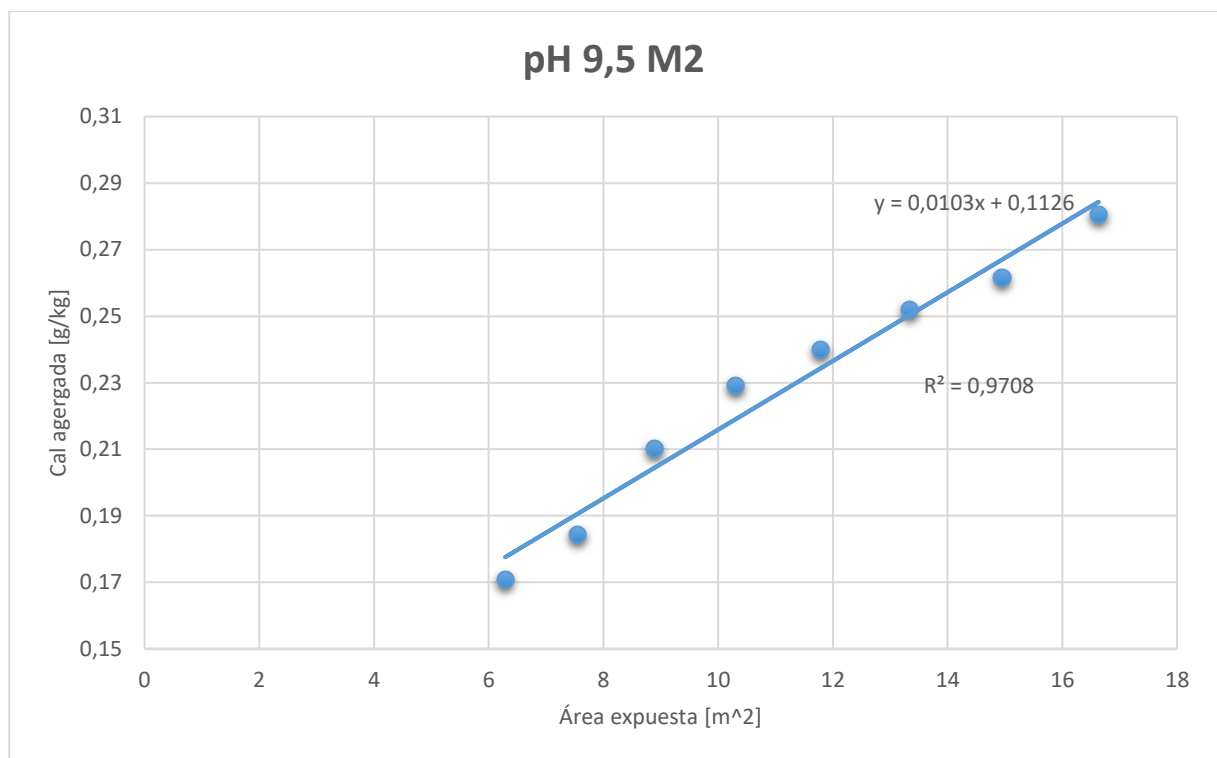


Figura 149 Relación lineal M2 pH 9,5

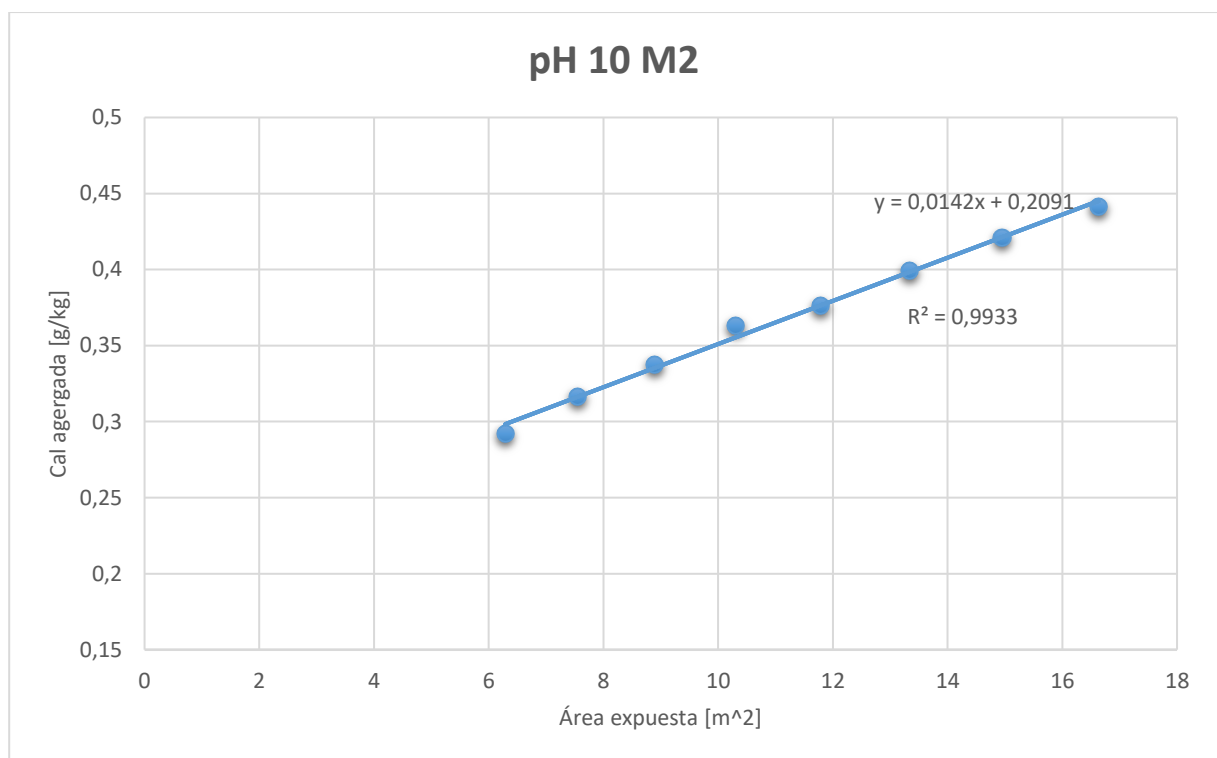


Figura 150 Relación lineal M2 pH 10

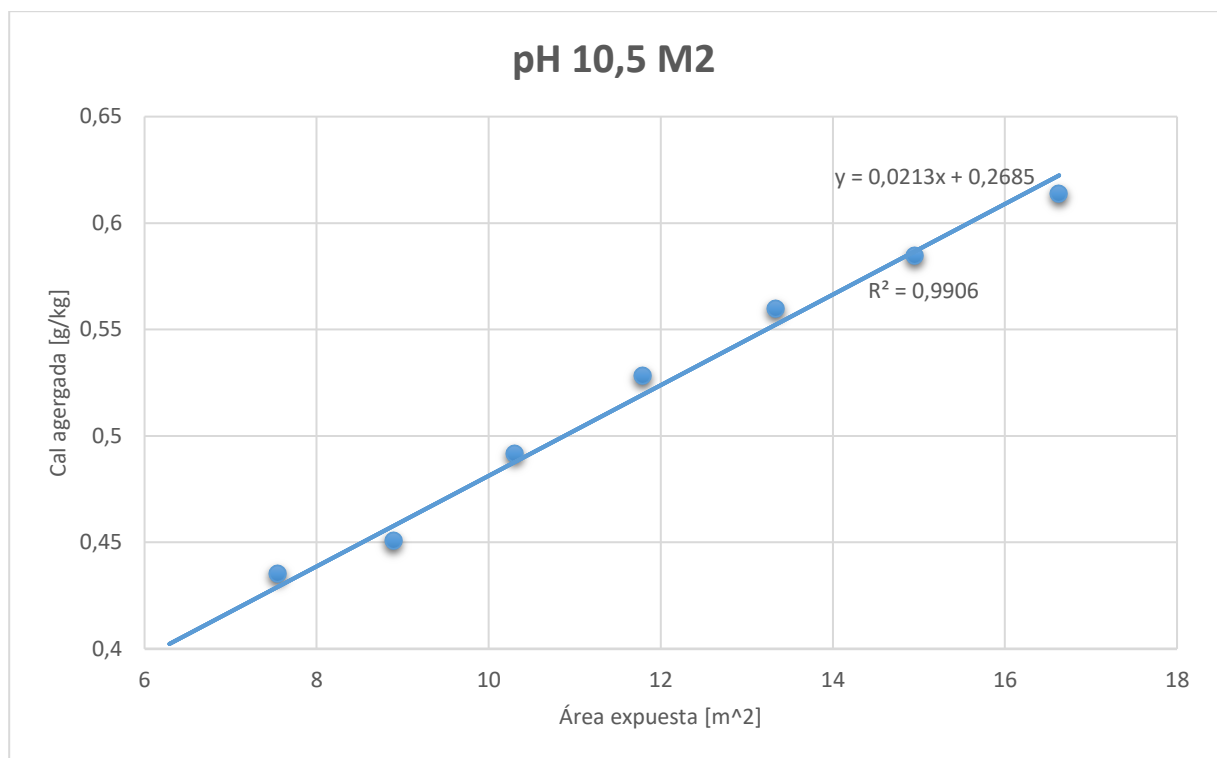


Figura 151 Relación lineal M2 pH 10,5

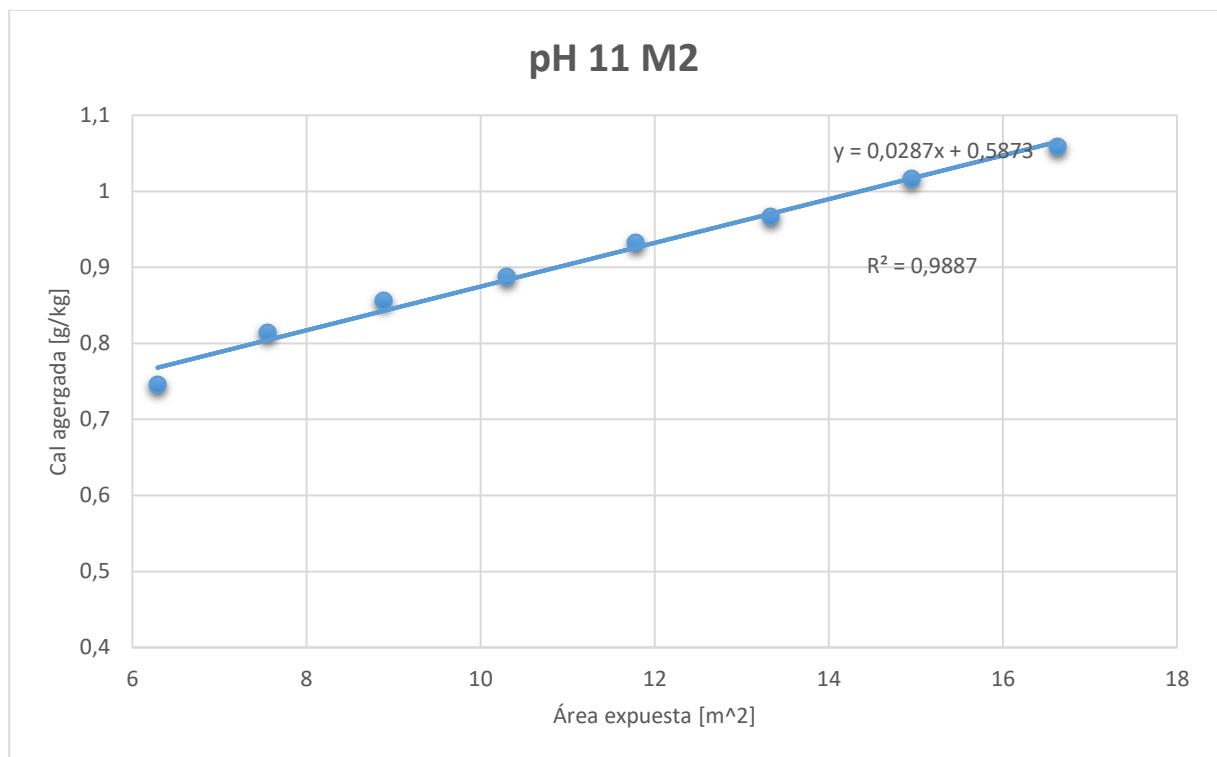


Figura 152 Relación lineal M2 pH 11

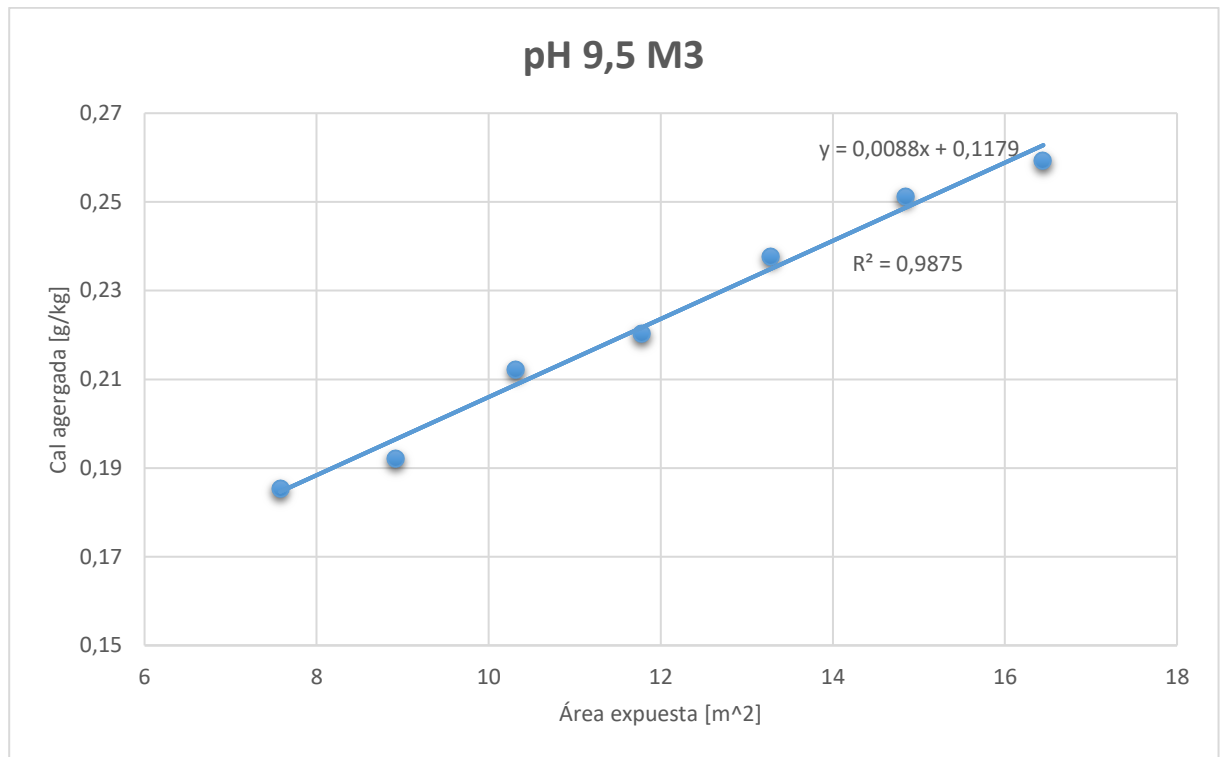


Figura 153 Relación lineal M3 pH 9,5

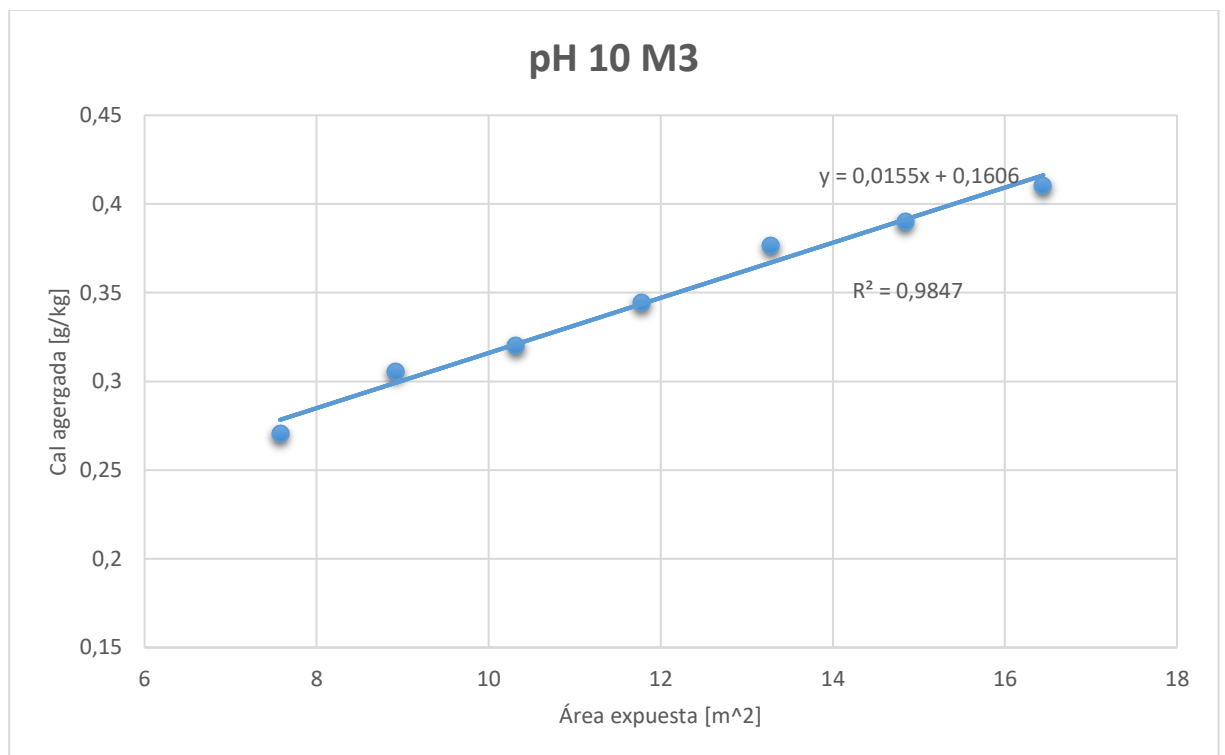


Figura 154 Relación lineal M3 pH 10

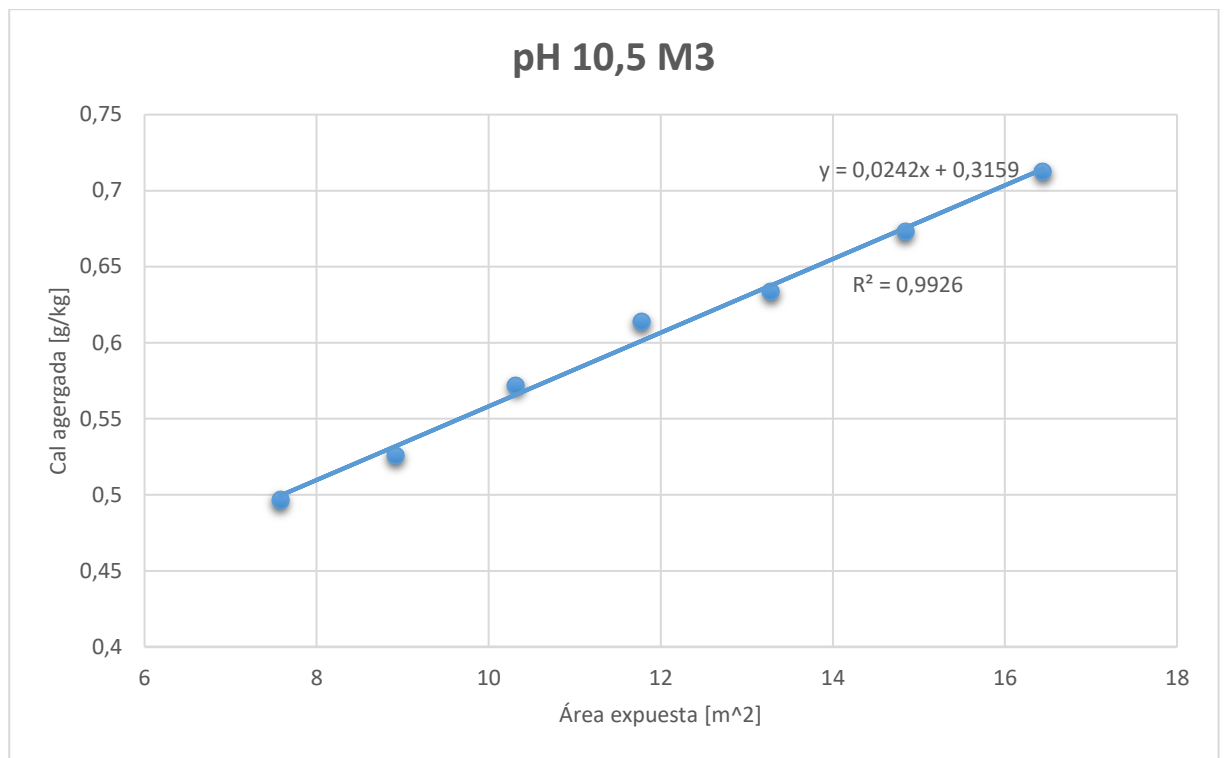


Figura 155 Relación lineal M3 pH 10,5

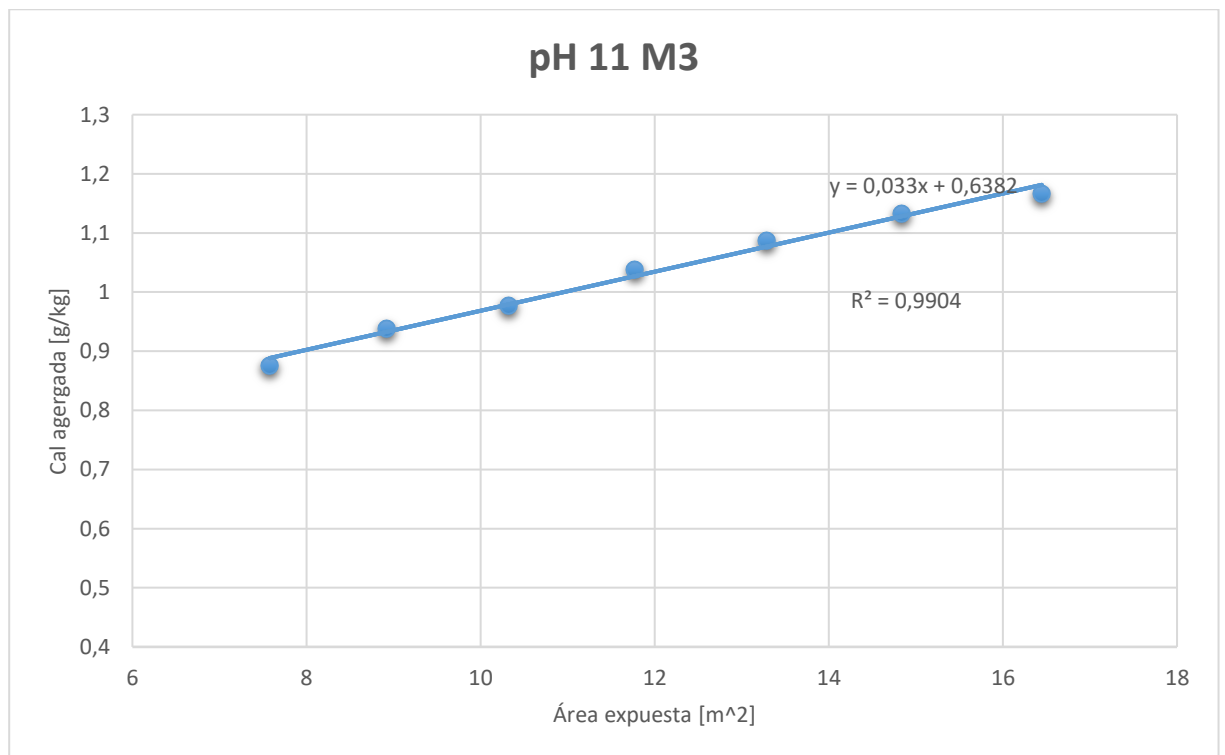


Figura 156 Relación lineal M3 pH 11

Presentado en las siguientes tablas resumen:

Tabla 68 Resumen ajuste lineal pH 11

pH 11	R^2	m
M1	0,9958	0,029
M2	0,9887	0,021
M3	0,9904	0,033

Tabla 69 Resumen ajuste lineal pH 10,5

pH 10,5	R^2	m
M1	0,9938	0,029
M2	0,9906	0,021
M3	0,9926	0,024

Tabla 70 Resumen ajuste lineal pH 10

pH 10	R^2	m
M1	0,9937	0,015
M2	0,9933	0,010
M3	0,9847	0,015

Tabla 71 Resumen ajuste lineal pH 9,5

pH 9,5	R^2	m
M1	0,9440	0,009
M2	0,9708	0,01
M3	0,9875	0,009