



MAESTRÍA EN DIRECCIÓN DE OPERACIONES Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE SATURACIÓN DE CAL EN CLINKER  
RESPECTO A LA HARINA DE ALIMENTACIÓN EN UN HORNO DE UNA  
EMPRESA CEMENTERA DEL ECUADOR

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Magister en Dirección de Operaciones y  
Seguridad industrial

**Profesor Guía:**

Ing. Mauricio Rojas D., MSc

**AUTOR:**

Ing. Diego Alejandro Moreno Hermosa

**Año**

**2015**

### **DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA**

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante orientando su conocimiento para un adecuado desarrollo del tema escogido, y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los trabajos de titulación”

Ing. Mauricio Rojas D., MSc.

CC: 1708880495

### **DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE**

“Declaro que este trabajo es original de mi autoría; que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”

Ing. Diego Moreno

CC: 1716662554

## RESUMEN

La presente tesis es una modelación estadística de un proceso conocido de clinkerización en una planta cementera del Ecuador. El objetivo es entender el impacto que las variabilidades de ciertos factores como: variaciones de pureza de materias primas y variaciones de parámetros de control de calidad producen sobre la calidad del subproducto mineral identificado como clinker.

Este entendimiento es realizado a través de un análisis de sensibilidad de cada caso específico para poder suponer varios escenarios y generar un modelo que pueda combinar las variabilidades y también contener el comportamiento del reactor de acuerdo a los datos históricos disponibles.

Para realizar el modelo se ha procedido a utilizar una regresión lineal múltiple con tres variables explicativas; los datos utilizados constituyen un muestreo de datos debidamente depurados antes de su tabulación y uso en la regresión.

Para explicar las variabilidades de las variables explicativas y poder realizar el análisis de sensibilidad en la salida se ha utilizado el ajuste estadístico de frecuencias de distribución de cada variable.

Una vez realizado el modelo este ha sido validado y verificado en cuanto a la bondad de su ajuste y a la normalidad de los residuos que el ajuste provoca, al igual que las distribuciones que representan las variabilidades de las variables explicativas.

Para usar el modelo se han modificado las distribuciones de las variables explicativas; incrementado las desviaciones estándar que las representan; esto se ha alimentado al modelo lineal de manera que sea posible verificar el impacto que esto provoca en la desviación estándar de la variable de salida (Parámetro de control de calidad identificado como C3S del clinker.)

Después del análisis de cada caso se ha podido priorizar las variables de mayor impacto de manera que sea posible recomendar los parámetros de control de calidad con el fin de optimizar la estabilidad del proceso actual.

## ABSTRACT

This thesis is a statistical modeling of a known Clinker Kiln process in a cement plant in Ecuador. The goal is to understand the impact of the variability of such factors as variations in raw material purity and variations of quality control parameters on the clinker process production

This understanding is made through a sensitivity analysis of each specific case to assume several scenarios and have a model that can combine the variabilities and also contain the behavior of the reactor according to historical data available

To make the model was carried out using a multiple linear regression with three explanatory variables; the data used are a 1200 sampling points duly released before analysis tabulation and use in regression.

To explain the variability of the explanatory variables and modify them to verify the impact on output has been used statistical adjustment frequency distribution of each variable.

Once finished the model; it that has been validated and verified in terms of goodness of fit. As well as distributions that represents the variability of the explanatory variables.

In order to use the model; the distributions of the explanatory variables; were modified; increasing the standard deviations that represent them; this has been fed in to the linear model so; is possible to verify the impact that this promotes on the standard deviation of the output variable (quality control parameter identified as C3S clinker.)

After analyzing each case it had been possible to prioritize the impact over the model output is order to make recommendations for optimize the quality control and process steadiness.

## INDICE

CAPÍTULO 1. ....	1
1 Introducción .....	1
1.1 Control estadístico de proceso en la industria de Cemento..	1
1.2 Diferencias atribuidas a las técnicas de muestreo.....	2
1.3 Perturbaciones en el proceso.....	3
1.4 Importancia de la regularidad en el control de calidad.....	3
1.5 Problemática general de la industria .....	5
1.6 Objetivos .....	5
1.7 Objetivos Generales.....	5
1.8 Objetivos Específicos .....	5
1.9 Justificación de la Investigación .....	6
1.10 Aspectos Metodológicos.....	7
1.10.1 Metodología Explorativa:.....	7
CAPÍTULO 2. ....	9
2 Marco teórico. ....	9
2.1 Cadena de valor típica de una industria Cementera.....	9
2.1.1 Procesos de valor .....	10
2.1.2 Procesos de Soporte .....	14
2.1.3 Procesos de Control .....	16

2.2	El proceso moderno de fabricación de cemento.....	17
<b>CAPÍTULO 3.</b> ....		<b>35</b>
<b>3</b>	<b>Representación de datos históricos.....</b>	<b>35</b>
3.1	Crudo Horno, o Harina de Alimentación .....	38
3.1.1	Ajuste de Distribución de la SC Saturación de cal en el crudo .....	39
3.1.2	Ajuste de Distribución del MS Módulo de Sílice en Crudo .....	40
3.1.3	Ajuste de Distribución del MA Módulo de Alúmina en Crudo.....	41
3.1.4	Ajuste de Distribución del C3S Potencial en el Crudo .....	42
3.2	Clinker producido a partir del Crudo Horno .....	43
3.2.1	Ajuste de Distribución de la KSC Saturación de cal en el clinker .	45
3.2.2	Ajuste de Distribución KMS Módulo de sílice en el clinker .....	46
3.2.3	Ajuste de Distribución KMA Módulo de Alúmina en el clinker.....	47
3.2.4	Ajuste de Distribución KC3S; C3S en el clinker.....	47
3.2.5	Ajuste de Distribución CaOI; Cal libre en el clinker; CL .....	49
<b>CAPÍTULO 4.</b> ....		<b>50</b>
<b>4</b>	<b>Modelo estadístico del proceso de Calcinación.....</b>	<b>50</b>
4.1	Determinación de variables de entrada .....	50
4.1.1	Variables explicativas relativas a la calidad del crudo .....	51
4.1.2	Variables explicativas relativas al proceso. ....	51
4.1.3	Regresión lineal múltiple como modelo predictivo .....	52
4.1.4	Interpretación de resultados .....	54

4.1.5	Validación del Modelo con técnicas estadísticas .....	56
<b>CAPÍTULO 5. ....</b>		<b>59</b>
<b>5</b>	<b>Análisis de sensibilidad para cada caso .....</b>	<b>59</b>
5.1	Modelo de Control o referencia de variaciones.....	59
5.1.1	Distribuciones de variables explicativas .....	60
5.1.2	Distribuciones de KC3S, Salida del modelo .....	61
5.1.3	Síntesis Gráfica del modelo general .....	62
5.2	Falta de representatividad del muestreo en el proceso. ....	63
5.2.1	Variable explicativa SC.....	64
5.2.2	Variable explicativa KSC .....	64
5.2.3	Variable explicativa CL .....	65
5.3	Calidad de Materias Primas.....	65
5.3.1	Crudo de Alimentación al Horno .....	66
5.3.2	Ajuste de Distribución de CaO Óxido de Calcio.....	67
5.3.3	Ajuste de Distribución de Dióxido de Sílice SiO <sub>2</sub> .....	67
5.3.4	Ajuste de Distribución de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Alúmina .....	68
5.3.5	Ajuste de Distribución de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Hierro .....	68
5.3.6	Ajuste de Distribución de SO <sub>3</sub> Azufre.....	68
5.3.7	Impacto de Variación de CaO.....	69
5.3.8	Impacto de Variación de SiO <sub>2</sub> .....	71
5.3.9	Impacto de Variación de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	71

5.4	Incidencia de factor humano, Analista de turno.....	72
CAPÍTULO 6.....		73
6	Síntesis de los datos de sensibilidad Obtenidos .....	73
6.1	Variación de SC .....	73
6.2	Variación en el KCS del clinker producido.....	73
6.3	Variación en la cal libre del clinker resultante.....	74
6.4	Variación del contenido de CaO.....	74
6.5	Variación del contenido de SiO <sub>2</sub> .....	74
6.6	Variación del contenido de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	75
CAPÍTULO 7.....		76
7	Conclusiones y Recomendaciones.....	76
7.1	Conclusiones.....	76
7.1.1	Eficiencia .....	76
7.1.2	Liderazgo de costos como herramienta de competitividad .....	76
7.1.3	Eficiencia de costos = Estabilidad de Proceso continuo .....	76
7.1.4	Estabilidad Saturación de cal= Estabilidad de C3S.....	76
7.1.5	Validación del modelo obtenido.....	78
7.1.6	Superposición de sensibilidades.....	79
7.1.7	Entregable resultado del estudio .....	79
7.2	Recomendaciones.....	80

7.2.1	Acciones sobre las variables explicativas .....	80
7.2.2	Control del Contenido de SiO <sub>2</sub> en la Alimentación al horno .....	80
7.2.3	Actuar desde la fuente en el control de SiO <sub>2</sub> .....	80
7.2.4	Nuevo objetivo de Variabilidad de Cal libre .....	81
7.2.5	Acciones control sobre el proceso de calcinación .....	81
7.2.6	Efecto discreto de la variabilidad de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	81
7.2.7	Mejora continua en la variabilidad de las variables explicativas ...	82
8	REFERENCIAS .....	83
	ANEXOS .....	85

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cadena de valor de una empresa productora de Cemento.....	9
Figura 2 Diagrama BPMN del Proceso de Fabricación .....	13
Figura 3 Diagrama Esquemático Molino de Crudo Vertical.....	19
Figura 4 Identificación de Zonas de Cocción en el Proceso.....	28
Figura 5 Transformación de Harina Cruda a clinker.....	29
Figura 6 Detalle del proceso Básico de Molienda de Cemento .....	33
Figura 7 Detalle de interior molino de Bolas.....	34
Figura 8 Molinos de bolas en planta de Producción de Cemento .....	34
Figura 9 Flujograma de reacciones e identificación de relaciones .....	35
Figura 10 Desviación típica de SC vs KSC .....	37
Figura 11 Dist. logística de la Saturación de Cal en la Harina Cruda.....	40
Figura 12 Dist. lognormal del Módulo de Sílice en la Harina Cruda .....	41
Figura 13 Dist. Logística del Módulo de Alúmina en la Harina Cruda .....	42
Figura 14 Dist. RiskLogistic del C3S potencial en crudo .....	43
Figura 15 Distribución GAMMA para la Saturación de Cal en clinker .....	45
Figura 16 Dist. LogLogística para el Módulo de Sílice en Clinker. ....	46
Figura 17 Dist. Logistic del Módulo de Alúmina del Clinker.....	47
Figura 18 Dist. Weibull del C3S en el Clinker.....	48
Figura 19 Ajuste de distribución Lognom de la Cal libre en el clinker .....	49
Figura 20 Ideograma del modelo requerido .....	50
Figura 21 Representación gráfica del Modelo Objetivo .....	54

Figura 22 Comparación de las distribuciones normal y de residuos .....	58
Figura 23 Ajuste de distribución de modelo de salida para KC3S .....	61
Figura 24 Modelo gráfico del modelo .....	62
Figura 25 Distribución Gamma para CaO .....	67
Figura 26 Distribución Normal para SiO <sub>2</sub> .....	67
Figura 27 Distribución Normal para Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	68
Figura 28 Distribución Weibull para Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	69
Figura 29 Ajuste de distribución Extvalue, para SO <sub>3</sub> .....	69
Figura 30 Datos Históricos de KC3S vs Pronóstico del modelo .....	86
Figura 31 Datos Históricos de SC vs Pronóstico del modelo (KC3S) .....	87
Figura 32 Datos Históricos de CL vs Pronóstico del modelo (KC3S) .....	87
Figura 33 Datos Históricos de KSC vs Pronóstico del modelo (KC3S) .....	88
Figura 34 Residuos del ajuste vs Pronóstico del Modelo (KC3S) .....	88
Figura 35 Residuos del ajuste vs Saturación de Cal (Variable explicativa) .....	89
Figura 36 Residuos del ajuste vs CL (Variable explicativa) .....	89
Figura 37 Residuos del ajuste vs KSC (Variable explicativa) .....	90

## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Ecuación de Saturación de Cal .....	23
Ecuación 2 Ecuación del Módulo de Silicatos .....	24
Ecuación 3 Ecuación de Módulo de Alúmina .....	24
Ecuación 4 Reacción de Formación Aluminato tri - cálcico.....	27
Ecuación 5 Reacción de Formación Ferro Aluminato tetra - cálcico .....	27
Ecuación 6 Reacción de Formación Belita o Silicato Bi Cálculo.....	27
Ecuación 7 Reacción de Formación Alita o Silicato Tri Cálculo.....	27
Ecuación 8 Proporcionalidad de la cal libre.....	31
Ecuación 9 Ecuación de Bogue para cálculo del C3S.....	32
Ecuación 10 Ecuación de Bogue para el cálculo de C2S.....	32
Ecuación 11 Ecuación de Bogue para el cálculo de C3A.....	32
Ecuación 12 Ecuación de Bogue para el cálculo de C4AF .....	32
Ecuación 13 Cálculo del C3S presente en el clinker .....	32
Ecuación 14 Función de Proporcionalidad de la Cal libre .....	36
Ecuación 15 Función de Proporcionalidad del C3S Clinker .....	36
Ecuación 16 Función de Proporcionalidad compuesta del C3S Clinker .....	36
Ecuación 17 Modelo de regresión lineal Múltiple .....	53
Ecuación 18 Modelo de Pronóstico de Saturación del Cal en el clinker.....	53
Ecuación 19 Modelo de Pronóstico de KC3S.....	55
Ecuación 20 Modelo estadístico a utilizarse.....	60
Ecuación 21 Ecuación de Saturación de cal en el crudo.....	66

Ecuación 22 Ecuación de incertidumbre por repetibilidad de los ensayos ..... 72

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Análisis Químico Caliza Media Año 2014.....	20
Tabla 2 Análisis Físico Químico Arcilla Media 2014.....	20
Tabla 3 Análisis Físico Químico Sílice Media 2014.....	21
Tabla 4 Análisis Físico Químico Hierro Media 2014.....	21
Tabla 5 Análisis Químico de la Harina Cruda. ....	23
Tabla 6 Crudo Promedio 2014 expresado en sus relaciones químicas.....	25
Tabla 7 Análisis Químico Crudo Horno Promedio 2014. ....	26
Tabla 8 Relaciones Químicas Crudo Horno Promedio 2014.....	26
Tabla 9 Fases Mineralógicas del clinker .....	27
Tabla 10 Reacciones básicas del clinker .....	30
Tabla 11 Datos Crudo Horno 2012- 2013 .....	38
Tabla 12 Estadística Descriptiva Crudo Horno.....	39
Tabla 13 Registros de clinker producido .....	44
Tabla 14 Estadística Descriptiva Clinker Producido a partir del Crudo Horno..	44
Tabla 15 Extracto de Salida de Herramienta de Regresión múltiple StatTools	54
Tabla 16 Escala de bondad de ajuste de regresión .....	55
Tabla 17 Niveles de significancia para las variables explicativas del modelo ..	56
Tabla 18 Tabla de salida de aplicación del Modelo $KC3S=f(SC, CL, KSC)$ ....	56
Tabla 19 Prueba de Normalidad Chi cuadrado ejecutada a los residuos.....	57
Tabla 20 Distribución para variable explicativa SC .....	60
Tabla 21 Distribución para variable explicativa CL.....	60

Tabla 22 Distribución para variable explicativa KSC .....	60
Tabla 23 Distribución para variable de salida KC3S .....	61
Tabla 24 Análisis de la distribución de Salida del Modelo .....	63
Tabla 25 Análisis de sensibilidad del modelo para Desv. estándar de SC .....	64
Tabla 26 Análisis de sensibilidad del modelo para Desv. estándar de KSC. ...	65
Tabla 27 Análisis de sensibilidad del modelo para Desv. Estándar de CL .....	65
Tabla 28 Datos de óxidos Harina de Alimentación al Horno, Crudo Horno .....	66
Tabla 29 Análisis de Sensibilidad para Desv Estándar de CaO .....	71
Tabla 30 Análisis de Sensibilidad para Desv Estándar de de SiO <sub>2</sub> .....	71
Tabla 31 Análisis de Sensibilidad para Desv Estándar de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	71
Tabla 32 Tabla de Incertidumbres en la medición .....	72
Tabla 33 Variación de $\sigma_{SC}$ y su impacto en la $\sigma_{KC3S}$ .....	73
Tabla 34 Variación de $\sigma_{C3S}$ y su impacto en la $\sigma_{KC3S}$ .....	73
Tabla 35 Variación de $\sigma_{CL}$ y su impacto en la $\sigma_{KC3S}$ .....	74
Tabla 36 Variación de $\sigma_{CaO}$ y su impacto en la $\sigma_{KC3S}$ .....	74
Tabla 37 Variación de $\sigma_{SiO_2}$ y su impacto en la $\sigma_{KC3S}$ .....	74
Tabla 38 Variación de $\sigma_{Al_2O_3}$ y su impacto en la $\sigma_{KC3S}$ .....	75
Tabla 39 Salida del Modelo de Ajuste Corrido en Stat Tools. ....	86
Tabla 40 Base de datos de pronósticos del Modelo .....	90

## **CAPÍTULO 1.**

### **1 Introducción**

Ecuador y toda la región latinoamericana caen dentro de la clasificación de Mercado Emergente de Cemento y materiales de construcción debido a su alta demanda impulsada por su crecimiento acelerado de vivienda e infraestructura tal como lo establece (FICEM Activity Report, 2013, págs. 23, 24), por lo que se ha observado de interés el realizar un análisis detallado del proceso actual de control de Calidad Estadístico de tipo continuo en esta industria.

#### **1.1 Control estadístico de proceso en la industria de Cemento**

Debido a que la industria del cemento depende del principal subproducto, conocido como clinker; producido a base de la sinterización de Caliza, Arcilla, mineral de hierro y mineral de sílice, el control sobre la producción del clinker es clave para el desarrollo de los objetivos de estabilidad, productividad, reactividad y tipos de cemento a partir de la composición química del clinker (DUDA, 1977, págs. 3-5).

La industria del cemento, y por ende la producción de clinker está calificada como industria pesada debido a la naturaleza del proceso térmico y a la gran cantidad de energía térmica y eléctrica requerida para el proceso de sinterización. La estabilidad de la composición química del clinker por tanto es un objetivo a seguir para mantener la operación estable del proceso ya que de ella se derivan sus características de quemabilidad de harina.

La quemabilidad de la harina está definida de acuerdo a la ASOCEM (Asociación de Productores de Cemento del Perú), como “el factor que determina cual será la temperatura necesaria en la zona de cocción del horno para lograr un producto de clinker satisfactorio” (FLSmidth Institute, 2002)

Desde la aparición de medición por fluorescencia de rayos X, a esta industria le ha sido posible estimar hasta el 99,9 % de los óxidos que componen los minerales que están presentes en el clinker, pero esta precisión ha presentado

adicionalmente la oportunidad de identificar desviaciones existentes en la química resultante vs la química de la harina de entrada al horno

“Estos métodos analíticos <no destructivos> se viene utilizando en la industria del cemento desde 1970, bien sea para el análisis elemental cuantitativo por fluorescencia (espectrometría de rayos x) o para la determinación cuantificaba de las fases de difracción (difractometría de rayos x)” (LABAHN Otto, 1985)

El desarrollo de los últimos 50 años ha cambiado esta industria de tipo bache o lote a industria del tipo de proceso continuo de operación ininterrumpida, con las ventajas en ahorros de energía pero agregando la complicación del control del producto elaborado. Las relaciones entre los óxidos que conforman el clinker no siempre poseen la misma estabilidad o condición química de los materiales crudos que los originaron. (Ver Relaciones del Crudo 2.2.1.1.5)

Normalmente la mayor diferencia la presenta el factor conocido como saturación de cal, (Ver Saturación de cal LSF 2.2.1.2) el mismo que puede variar en varios puntos diferenciales o aditivos; si se compara este factor en el clinker, vs la harina de alimentación.

La industria normalmente atribuye esta diferencia a cambios de la granulometría del crudo que provocan cambios en la química de las fracciones finas del contenido de alimentación, que al ser arrastrados en el torrente de gases del horno, recirculan hacia el horno afectando el producto conocido como clinker. Debido a la dificultad de muestreo de esta condición, se ha tolerado esta diferencia en desmedro de la estabilidad y calidad del clinker

## **1.2 Diferencias atribuidas a las técnicas de muestreo.**

Las técnicas clásicas de muestreo para grandes flujos de sólidos en la industria del cemento en términos prácticos no se respetan ya que esto representaría toma de grandes muestras y procesos de homogenización de las mismas que resultan inconvenientes para un sistema que posee un plan de calidad intensivo; por esta razón los muestreos son acumulativos y las cantidades

muestreadas suponen diferencias que están en el límite de la precisión de los métodos usados y que también se toleran.

Esto ha permitido ocultar detrás de bajas representatividades de muestreos las diferencias que hoy se presentan en la regularidad del clinker obtenido

### **1.3 Perturbaciones en el proceso.**

Normalmente el torrente de gases de la industria se aprovecha para secado de otras materias primas y adiciones y hasta para cogeneración a partir del calor generado. Esto supone una variación o una perturbación al proceso que normalmente suele ser intermitente, y afecta significativamente la química del polvo de retorno, principal alterador de la química de alimentación.

El horno o reactor calcina los elementos constitutivos del clinker en una reacción exotérmica. El resultado final dependerá de la variabilidad de la harina de alimentación, la estabilidad del proceso, (esto supone tolerar ciertas perturbaciones concebidas como parte del diseño de proceso de una fábrica de cemento).

La aleatoriedad de las perturbaciones ha ocultado su incidencia sobre la variabilidad del resultado final y en general en la industria. Éstas no son estudiadas mientras no generen impactos significativos en el costo de producción del clinker, por lo que se ha limitado el análisis y por tanto se presenta como una amplia justificación a las variaciones químicas de la alimentación de un horno de clinker.

### **1.4 Importancia de la regularidad en la calidad; impacto en costos de la reactividad del clinker**

La reactividad del clinker está determinada por su regularidad y por sus características químicas; las mismas que dependen de las proporciones y características de las materias primas utilizadas para constituir las fases minerales del clinker. Dado que el principal componente es el óxido de calcio y sus combinaciones con silicatos, aluminatos y óxido de Hierro, la saturación de cal y la proporción de sus combinaciones en forma de silicatos ha sido

ampliamente utilizado en la industria como un indicador de la reactividad del clinker, este indicador conocido como LSF. (Lime Saturation Factor) y el C3S (Silicato Tricálcico), indican por una parte la potencialidad de las combinaciones y por otra parte las combinaciones estimadas realizadas en el horno a través de las ecuaciones de Bogue.

Un clinker con LSF estable, a través de un proceso de sinterización estable, supone un C3S también estable, la variabilidad de la harina de alimentación debe determinar las variaciones del resultado.

La empresa observada produce cementos puzolánicos bajo las normas INEN 490 e INEN 2380, por lo que estos se conocen como cementos combinados, los mismos que poseen adiciones de puzolanas naturales como elementos reactivos en la combinación del elemento final. (INEN, 2011)

Además del clinker y la puzolana natural volcánica se adiciona yeso natural o sintético como regulador de fraguado, en una proporción que depende del tipo de producto o especificación a construir

Una de las herramientas de mayor impacto en la industria es la proporción de adiciones de puzolana que se hace sobre la mezcla para la obtención de producto final; es decir mientras más reactivo es el clinker, menor cantidad de este se requerirá en una mezcla de clinker y puzolana para conseguir cumplir las normas de cumplimiento de producto y las características de trabajabilidad fluidez, demanda de agua, etc.

En conclusión, cuanto más reactivo es el clinker, será posible agregar más puzolanas naturales a la mezcla para que junto con el yeso, se puedan conseguir los resultados esperados de calidad.

La proporción de costo entre el clinker y la puzolana es de aproximadamente 18 veces; con evidente ventaja de la puzolana respecto al clinker, debido a la naturaleza geográfica y geológica de la sierra del país; éste cuenta con exuberantes yacimientos de puzolanas activas que pueden utilizarse como adiciones para conseguir cementos puzolánicos de acuerdo a las normas,

mientras que el clinker es un mineral artificial que requiere grandes cantidades de energía para su producción.

La regularidad y disminución de la variabilidad de las características del clinker, facilitará la optimización de las adiciones de puzolana permitiendo fabricar más cemento con menor cantidad de clinker con el correspondiente impacto positivo en costos variables sobre la matriz de costos de la empresa.

### **1.5 Problema general en la industria imputado subjetivamente a causas conocidas.**

A pesar del gran impacto que supone sobre los resultados, en general en las plantas industriales de cemento no existe una imputación directa de la variabilidad no deseada en el clinker. En la mayoría de los casos se tolera las diferencias sin realizar ninguna medición a profundidad que pueda arrojar medidas correctivas sobre el proceso o el control de calidad.

Esta tolerancia está principalmente determinada porque se aceptan las causas antes identificadas como probables y el análisis de las variaciones se realiza utilizando estadística descriptiva; en lugar de herramientas más profundas que puedan ayudar a relevar la incidencia de cada uno de los factores conocidos de forma cuantitativa.

### **1.6 Objetivos**

#### **1.7 Objetivos Generales**

Realizar el análisis de la variación de C3S, o silicato Tricálcico presente en el clinker respecto a la harina de alimentación en un horno de una empresa cementera del Ecuador

#### **1.8 Objetivos Específicos**

- Identificar patrones, frecuencias, e incidencias en los datos que ayuden en la búsqueda de las causas de las variaciones de la calidad en los procesos de fabricación y de control de Calidad del subproceso de calcinación de la empresa observada

- Compilar los datos de 2 años de operación del proceso de calcinación, y establecer un método estadístico de análisis de las variaciones de los parámetros de calidad de la harina de alimentación del horno de Clinker.
- Establecer un modelo estadístico basado en el histórico de las variaciones del proceso de calcinación, y medir la sensibilidad frente a variaciones conocidas de distintas variables de entrada.

### **1.9 Justificación de la Investigación**

La identificación cuantitativa de las causas que agregan ruido a los datos continuos de saturación del cal en clinker y su impacto en la variabilidad de la calidad generan un diagnóstico real de las oportunidades de mejora aprovechables en el proceso de Fabricación y Control de Calidad; las diferencias que se presentan ahora son justificadas y hasta toleradas por presunciones cualitativas respecto al impacto de las perturbaciones del proceso, las incidencias del muestreo, la variabilidad de la materia prima, la repetitividad de los análisis, la incidencia del trabajo en turnos de analistas humanos y la incidencia de la exactitud y precisión del equipo de medición utilizado.

Basados en la presunción de que el 80% de las variaciones provienen del 20 % de las causas, al término de este análisis la empresa dispondrá de un diagnóstico priorizado para ejecutar acciones de corrección sobre sus propios procesos, es decir en el supuesto caso que las variaciones respondan a incidencias respecto a cierto turno nocturno, se podrían generar acciones respecto al horario de analistas o rotación de los mismos para minimizar el impacto, etc.

El análisis de las variaciones debe arrojar las incidencias, para actuar sobre las causas de las mismas.

Las herramientas estadísticas a utilizarse en este análisis podrán ser utilizadas como herramienta base para analizar datos de tipo serie de tiempo, abundante y típicamente presente en las industrias de proceso continuo como el de

fabricación de cemento, por ejemplo, tiempos de fraguado, resistencia a la compresión del producto terminado, etc.

## **1.10 Aspectos Metodológicos**

### **1.10.1 Metodología Explorativa:**

Desde el inicio de la operación del Proceso de Calcinación existen datos concretos de la química de la harina de alimentación y del clinker producido a partir de esta.

Con estos datos se podrá construir un modelo estadístico basado en las interacciones de las reacciones químicas y del proceso, denominado reactor de clinker.

Una vez obtenido el modelo de reactor se realizará una comparación del resultado real obtenido durante la producción y del teórico resultante a partir de las variaciones reales de las condiciones de entrada a este modelo, tales como química de entrada de materias primas e impacto de las perturbaciones del proceso.

Todos los datos de entrada sometidos al modelo, deberán ser verificados a través de análisis de series de datos o de ajuste de distribución para verificar variabilidad típica, frecuencias ocultas de incidencia; etc., para de esta forma identificar la variabilidad real esperada del resultado con respecto a sus variables de entrada.

Se prevé realizar un análisis de sensibilidad de la salida del modelo a partir de la variación de los datos de entrada para determinar los puntos de mayor impacto en la estabilidad de las características químicas de la producción de clinker.

Por lo anteriormente expuesto se requerirá la disponibilidad de la información de Materias Primas, Harina de Alimentación y clinker de al menos dos años de producción de la empresa cementera observada.

Se requerirá verificar el historial de calibraciones e intervenciones del equipo de medición por rayos X RXF, para verificar la incidencia la variabilidad producida por los ensayos sobre resultado final.

Para la verificación de la incidencia de la intervención humana se requerirá el historial de turnos del personal a cargo de los análisis ejecutados por el personal.

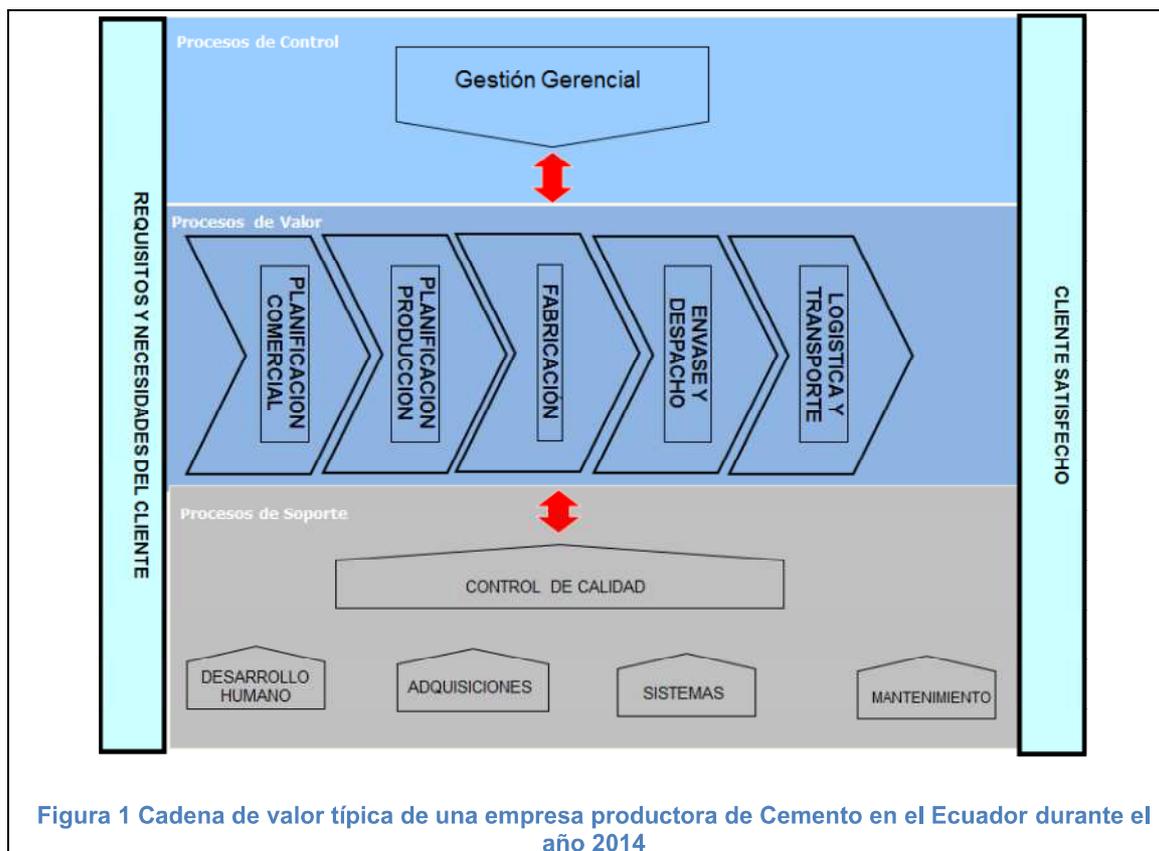
El entregable máspreciado de este análisis debe ser la ponderación por impacto de las variaciones de variables conocidas sobre el C3S o Silicato Tricálcico del clinker; con un estudio de sensibilidad para ayudar al lector a priorizar las acciones a ejecutar sobre el proceso de Fabricación/Control de Calidad.

## CAPÍTULO 2.

### 2 Marco teórico.

El Marco teórico a continuación describirá desde el ambiente organizacional la cadena de valor clásica (PORTER, 1997, pág. 60) de una compañía de producción de cemento con el fin de enmarcar los objetivos (Ver Objetivos Específicos 1.8) de la presente investigación dentro de los planes estratégicos, y operacionales de los procesos de cualquiera de los actores productivos del mercado nacional cementero y de esta manera entender el problema objeto de esta investigación. Una vez descrita la cadena de valor, se realizará una descripción del proceso de manufactura del cemento con énfasis en los procesos de formación de la Harina Cruda y su sinterización en clinker.

#### 2.1 Cadena de valor típica de una industria Cementera



## **2.1.1 Procesos de valor**

### **2.1.1.1 Planificación Comercial**

La cadena de Valor de una empresa cementera empieza con el requerimiento del Cliente en cuanto a Volúmenes y Productos de Cemento. El proceso de Planificación Comercial se encarga de garantizar la colocación del Volumen definido en el presupuesto anual de Ventas con criterio de satisfacción a los clientes. El proceso de Planificación Comercial se encarga además de la evaluación de satisfacción al cliente con una muestra representativa de cada sector de los mismos.

#### **Indicadores Relevantes:**

- Porcentaje de cumplimiento de volumen de ventas anual, con seguimiento mensual
- Porcentaje de satisfacción al cliente a través de encuestas trimestrales, La encuesta es aplicada a una muestra de clientes por cada producto.

### **2.1.1.2 Planificación de la Producción.**

Una vez determinado el Volumen de productos requeridos, la planificación de la Producción determinará los requerimientos de insumos, materias primas y demás necesidades para producir lo requerido en los plazos determinados por la Planificación Comercial

Por tanto el proceso de Planificación de la producción es responsable de establecer los objetivos de los procesos de Fabricación y Envase para el cumplimiento de dicho plan.

#### **Indicadores Relevantes:**

Volúmenes de Materias Primas, Subproductos, Productos terminados e Insumos de acuerdo al Presupuesto anual; con revisión mensual

#### **Materias Primas:**

Caliza, arcilla, mineral de sílice, mineral de hierro, yeso y puzolana.

## **Inventarios de Producción y Productividad de Subproductos:**

Clinker, Crudo.

## **Insumos de Fabricación**

Combustibles líquidos, Combustibles sólidos, Combustibles alternativos y energía eléctrica.

### **2.1.1.3 Fabricación**

Proceso industrial medular responsable de la fabricación de productos de acuerdo al requerimiento emitido por el proceso de planificación de la producción.

Para volver realidad el plan de Producción, el proceso de fabricación dispone de las materias primas, inventarios de subproductos e insumos requeridos para el proceso de manufactura.

El proceso de Fabricación de cemento, clinker y crudo corresponden a procesos continuos.

## **Relevancia del proceso para la cadena de valor**

### **Predictibilidad:**

La definición de “la expectativas del cliente”, y la planificación de la producción para el cumplimiento de las mismas definen los requerimientos de fabricación necesarios, sin embargo este es el proceso responsable de la ejecución del Plan de Producción de acuerdo a lo establecido, Esta ejecución debe realizarse sin interferencias ni problemas de desabastecimiento de insumos o de capacidad de Procesos.

### **Sostenibilidad**

Todo el proceso productivo deberá realizarse de la manera más eficiente posible, con el consumo energético óptimo en términos de costo y por tanto a la mayor fiabilidad operacional; es decir aun cuando el objetivo de volúmenes

sea cumplido; este por sí mismo no es suficiente para garantizar la sostenibilidad del Negocio. El proceso de fabricación es responsable de la optimización de los costos Variables de la organización y por tanto de un buen componente del margen o utilidad del negocio.

### **Seguridad:**

Definición de Operación industrial eficaz y eficiente, sin impacto en la condición de salud ocupacional de operadores y personal involucrado ni a corto ni a largo plazo. Esta prioridad prevalece sobre la Seguridad de la Maquinaria, sin embargo la seguridad de los activos de la empresa es parte de la estrategia de sostenibilidad de las Instalaciones y de los equipos y no será descuidada por el personal responsable del proceso de Fabricación.

#### **2.1.1.3.1 Principales indicadores del proceso**

##### **Fiabilidad del Proceso de Producción: Indicador de Gestión**

Debido a la naturaleza del proceso continuo el asegurar la operación permanente del proceso asegura la estabilidad y la eliminación de incidentes de variabilidad en Calidad y Volúmenes de Producción.

$$Fiabilidad \cdot proceso = \frac{Horas \cdot de \cdot operación \cdot reales}{Horas \cdot de \cdot operación \cdot planificadas} \cdot 100\%$$

Los incidentes operativos son todos aquellos que representan un paro del proceso de fabricación, Incluyen paros por falla de operadores, por incumplimiento de Procedimientos, etc.

##### **Consumo eficiente de energía eléctrica: Indicador de Gestión**

Consumo de energía eléctrica por tonelada de Cemento producida, componente clave del costo variable del Proceso de Fabricación.

$$Kwh / ton = \frac{Kwh \cdot consumidos}{Toneladas \cdot totales \cdot producidas}$$

### Consumo eficiente de energía Térmica: Indicador de Gestión

Consumo de energía térmica por tonelada de Cemento producida, componente clave del costo variable del Proceso de Fabricación.

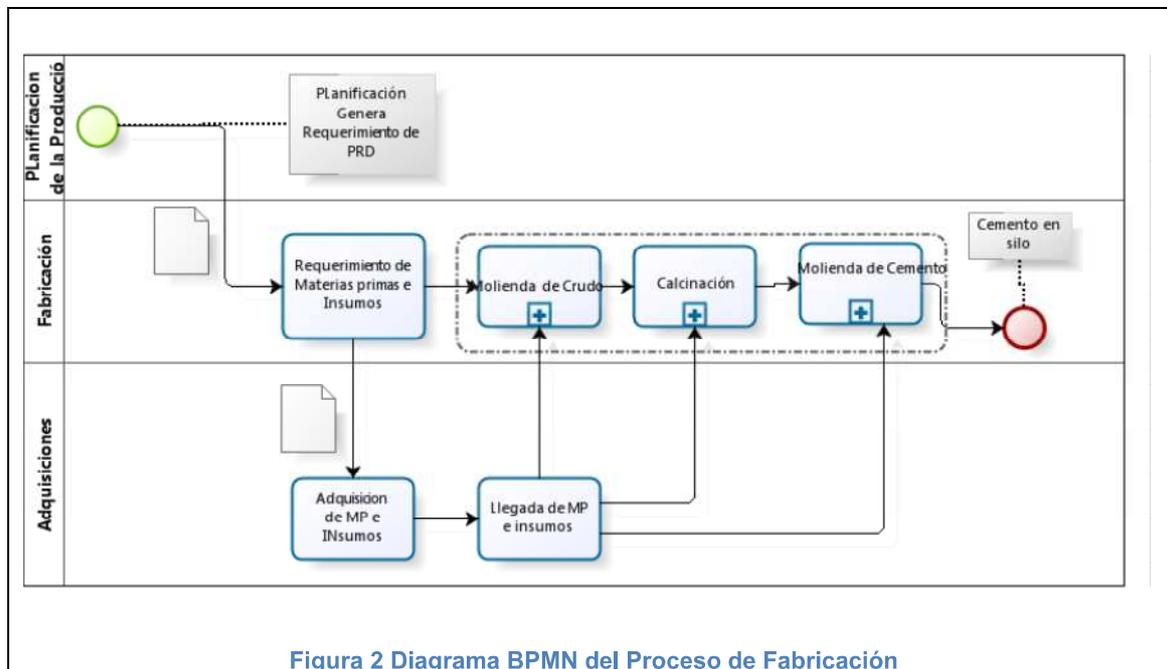
$$MJ / ton = \frac{MJ \cdot consumidos}{Toneladas \cdot totales \cdot producidas \cdot de \cdot clínker}$$

### Cumplimiento de Volumen de Producción: Indicador de Productividad

Referido a un período mensual. Sin embargo el seguimiento de este indicador y las acciones correctivas requeridas deben ser reacción a un análisis diario de resultados.

$$Cumpl \cdot Plan \cdot de \cdot Pr oducción = \frac{Volumen \cdot real \cdot producido}{Objetivo \cdot definido \cdot en \cdot el \cdot plan \cdot de Pr oducción} \cdot 100\%$$

#### 2.1.1.3.2 Diagrama BPMN del proceso



#### **2.1.1.4 Envase y Despacho**

Actividad Operacional diaria de empaclado de productos de acuerdo a los requerimientos del cliente, las actividades incluyen el envasado de cemento en sacos y en cisternas de despacho a granel. Este proceso recibe el producto de Fabricación en Silo de Almacenamiento y lo entrega a Logística y Transporte.

##### **Indicadores Relevantes:**

- Tiempo de espera de vehículos en carga
- Índice de rotura de sacos.
- Tiempo promedio de carga de vehículos (plataforma de sacos, y Cisternas de Granel)

#### **2.1.1.5 Logística y transporte**

Se trata del proceso de entrega del producto envasado a los clientes finales, esta entrega incluye el proceso de Facturación. Los criterios de desempeño de este proceso son:

##### **Indicadores Relevantes:**

- Entrega a tiempo
- Facturación Correcta
- Pedido Completo

#### **2.1.2 Procesos de Soporte**

##### **2.1.2.1 Control de Calidad, Proceso de Soporte**

Proceso responsable del control de calidad a través de la medición de los atributos definidos por el cliente como marco de referencia de calidad. Este aseguramiento de la calidad se realiza a través de Control Estadístico del proceso de Fabricación empleando la medición de variabilidad y homogeneidad de los parámetros que conforman dicho marco sobre el producto final y el producto en proceso.

Cuando los valores de medición están fuera de las bandas de control, Fabricación realizará las correcciones necesarias para regresar el proceso a las condiciones de operación requeridas para que el producto ingrese nuevamente en el Marco de Control de la Calidad.

Los parámetros medidos pueden incluir, Resistencias, Tiempos de Fraguado, Análisis Químico, etc. Dichos parámetros forman parte de la definición de Calidad para cada producto.

**Indicadores Relevantes:**

Cumplimiento Marco Legal INEN 490, INEN 2380 De acuerdo al producto específico.

Índice de uniformidad de Tiempos de Fraguado; Finura; y Resistencias de acuerdo a los parámetros especificados por la Norma de cumplimiento de los Productos y de acuerdo a los requerimientos definidos por el cliente.

**2.1.2.2 Desarrollo Humano, Proceso de Soporte**

Administración del talento humano para asegurar la competencia del personal Responsable y Operativo de los procesos de la empresa, de manera que los objetivos definidos en cada uno de ellos sea alcanzable.

**Indicadores Relevantes:**

Alcanzar el 90% de cumplimiento del plan de formación general del personal que forma parte de la organización. Este plan debe ser acordado con cada área antes de su aplicación.

**2.1.2.3 Adquisiciones, Proceso de Soporte**

Compra de Insumos, materia prima, consumibles y todo bien requerido para el cumplimiento de los objetivos de los procesos.

**Indicadores Relevantes:**

Tiempo de espera desde solicitud de Compra hasta la llegada del bien a bodega.

#### **2.1.2.4 Sistemas Informáticos, Proceso de Soporte**

Tecnología de la información, Soporte de Herramientas de Manejo de la Información. El funcionamiento de este proceso se basa en el desarrollo de aplicaciones para automatización de procesos, la gestión automática de sus indicadores y el control continuo de las actividades que cada uno de ellos genera.

#### **2.1.2.5 Mantenimiento, Proceso de Soporte**

Proceso encargado de la ejecución del Mantenimiento Preventivo y Correctivo de la Maquinaria que forma parte del Proceso Productivo de Fabricación.

#### **Indicadores Relevantes**

Fiabilidad de Planta Industrial. Definida como las horas reales disponibles de los equipamientos de producción de un período, expresadas como porcentaje de las horas planificadas totales de trabajo estipuladas en el plan de Producción para el mismo período.

#### **2.1.3 Procesos de Control**

Los Procesos de Control se encuentran agrupados en un proceso denominado "Gestión Gerencial", su funcionalidad incluye pero no se limita al seguimiento de los resultados y definición de estrategia de la Organización, actualizando y modificando los objetivos de los procesos, con el fin de conseguir los objetivos de Satisfacción al cliente en cuanto a:

- Calidad
- Disponibilidad de Producto, Volumen
- Tiempo de Entrega, Facturación Correcta, Volumen Correcto.
- Atención al Cliente y Satisfacción General al cliente

## 2.2 El proceso moderno de fabricación de cemento.

Desde su aparición en 1843 y la primera patente británica concedida a William Aspdin, el cemento portland no ha sufrido grandes transformaciones; éste continua siendo un mineral artificial sinterizado en un reactor de estado sólido; el producto de esta reacción es un polvo finamente molido que al contacto con el agua provoca la reacción de sus fases minerales que le confieren las propiedades de fraguado y resistencia mecánica a la compresión (BATTHY, Javed I, 2004, págs. 1-9). Sin embargo respecto al proceso de fabricación del mismo la evolución ha sido diferente.

El proceso ha sufrido grandes transformaciones en las últimas décadas. Estos cambios han sido siempre orientados a minimizar el costo de producción para maximizar el margen que proviene de sus volúmenes significativos de producción y ventas.

En sus inicios el proceso de fabricación se lo realizaba en baches de producción por lotes en hornos estáticos, (BATTHY, Javed I, 2004, pág. 12) Hasta que en el siglo XIX se patentó el horno rotativo de clinker, el mismo que tuvo mejoras significativas con la adición de precalentadores y Precalcinadores con el fin de obtener eficiencias térmicas que implicaran un mayor ahorro en costos de Producción.

“A finales del siglo XIX apareció en Gran Bretaña el horno rotatorio; y hoy en día el piro procesamiento del crudo con el fin de obtener el clinker tiene lugar, casi exclusivamente con este tipo de horno. Frederick Ransome introdujo el horno rotatorio en la industria del cemento. Ransome patentó su invención, primero en Inglaterra, patente inglesa n° 5442 del 2 de mayo de 1885, con el título "Perfeccionamiento en la industria del cemento" y después en EE.UU. (patente U.S. n° 340.357 del 20 de abril de 1886 con el título "Fabricación del cemento", etc.)” (BLANCO, págs. 25,30)

Lo mismo ha pasado con las diferentes técnicas de molienda disponibles en las últimas décadas, todas han sido orientadas a la disminución de la cantidad de energía requerida para obtener el producto final; (DUDA, 1977) esta es una

alineación perfecta de evolución de eficiencia técnica y económica desde que el cemento Portland apareció en la industria,

Para entender claramente lo descrito el proceso de producción de clinker se dividirá en 3 Subprocesos, que se describen a continuación.

### **2.2.1.1 Molienda de Crudo**

La molienda de crudo es esencialmente un proceso de secado, trituración y pulverización de varios minerales esenciales que conformarán el subproducto conocido como Harina Cruda. (DUDA, 1977, pág. 57)

Los principios de realización de la molienda han evolucionado con respecto a la eficiencia y la técnica disponible para conseguir los resultados de finura, con el concreto de eficiencia eléctrica incorporado en el mismo.

El proceso consiste en realizar una mezcla pulverizada, consistente y uniforme en términos de composición química y finura para asegurar que la reacción físico-química a la que será sometida en el siguiente proceso entregue un producto uniforme.

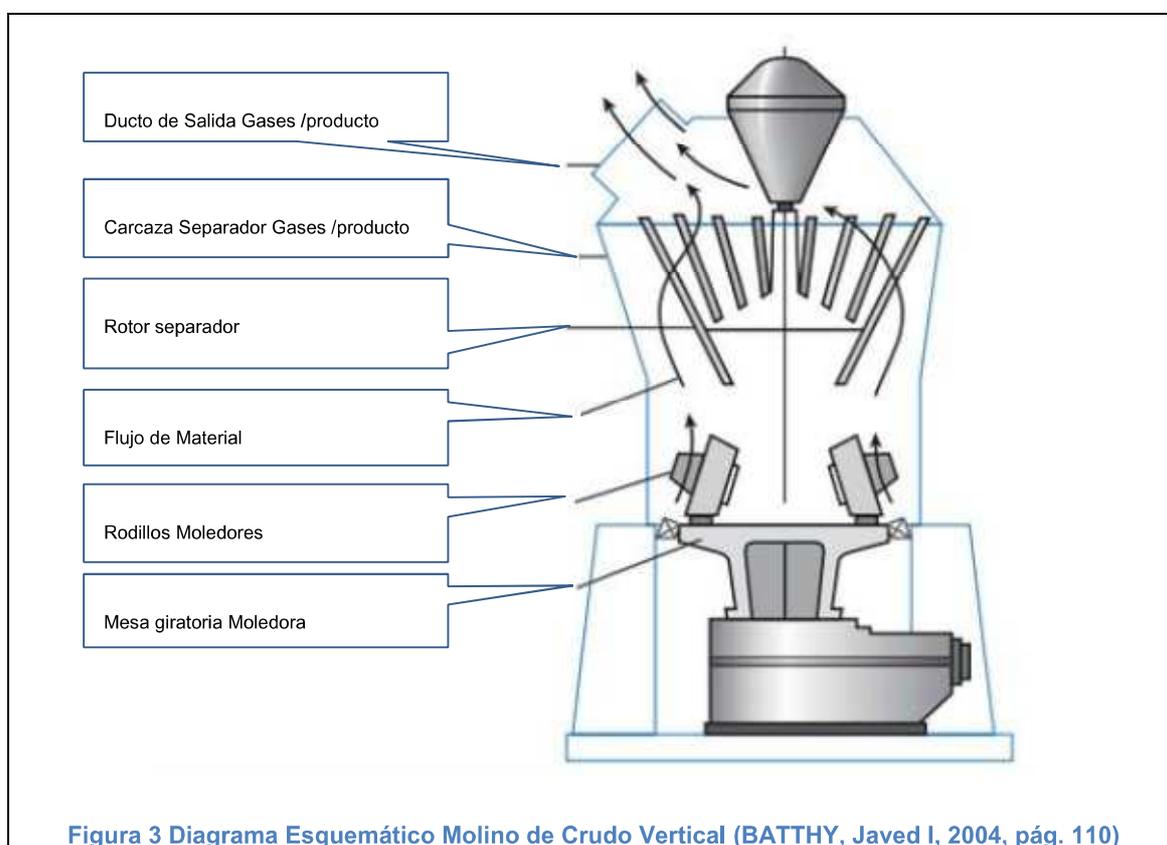
El proceso de fabricación de crudo inicia con la disponibilidad en planta de las materias primas requeridas. Esta disponibilidad y homogeneidad está determinada por la Técnica Minera y Geológica responsables de la explotación de las mismas debido a esta condición la calidad de las materias primas constituye una huella individual de cada sitio de producción de cemento.

Normalmente los procesos Geológicos, Mineros y de Cadena de Suministros forman parte de las operaciones en una compañía de fabricación de cemento, el detalle de estas técnicas no será revisado en el presente análisis, por lo que para efectos del modelo descrito en el Capítulo 3 la materia prima se considera disponible en la planta industrial.

Para la formulación del crudo es son necesarios, 4 minerales esenciales: Caliza, Arcilla, Mineral de Sílice y Mineral de Hierro; la pureza y calidad de

cada uno de ellos determinará la proporción de cada materia prima en la mezcla a triturarse para convertirse en Harina Cruda.

“El principal objetivo del diseño de la harina cruda es crear un producto de alimentación al horno que permita una producción de clinker a un costo energético razonable y que la calidad del mismo cumpla con lo solicitado por el mercado. Debido a que el clinker posee objetivos muy específicos en su composición; éste debe poseer porciones substanciales de Calcio, Sílice, Alúmina y Hierro; los porcentajes típicos de estos elementos en el clinker son  $\text{CaO} = 65 \pm 3\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 21 \pm 2\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 5 \pm 1.5\%$ , and  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 3 \pm 1\%$ ” (BATTHY, Javed I, 2004, pág. 65)



La pureza está determinada por la concentración de cierto óxido en cada mineral.

#### 2.2.1.1.1 Calizas Concentración de Carbonatos de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ )

La caliza aporta los carbonatos y su pureza se mide en función de la cantidad de carbonatos totales que esta posee en su composición ( $\text{CaCO}_3$ ).

**Tabla 1 Análisis Químico Caliza Media Año 2014.**

PF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TOTAL	Humedad	CaCO <sub>3</sub>
41,20	2,58	0,52	0,36	54,33	0,99	100,0	2,79	96,7

**Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio**

La Caliza constituye entre el 70% y 80% de la formación de masa del crudo; su principal aporte es el óxido de calcio presente en los carbonatos, pero para ser aprovechable este debe ser liberado del componente CO<sub>2</sub>, en el proceso identificado como descarbonatación.

Las calizas aprovechables como fuente de óxido de cal para la industria cementera están en el rango de contenido de CaO superior a 50% en masa. (BATTHY, Javed I, 2004, págs. 66-67).

Para el caso de la presente investigación, la caliza contiene 54,33% de componente de óxido de Calcio, lo que supone una excelente disponibilidad de la calidad de las materias primas.

Existen sin embargo fábricas que pueden procesar más de un material calcáreo como fuente de CaO para su crudo.

#### **2.2.1.1.2 Arcilla: Concentración de Aluminatos (Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>)**

La Arcilla aporta principalmente la alúmina, (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), sin embargo en su composición es evidente el alto contenido de Mineral de Sílice SiO<sub>2</sub>, por lo que ésta aporta Silicatos para la transformación de crudo en clinker.

Dependiendo de la disponibilidad de Materias primas, pueden utilizarse bauxitas, caolines y otros minerales de arcilla que cumplan con los criterios de diseño del crudo. (BATTHY, Javed I, 2004)

**Tabla 2 Análisis Físico Químico Arcilla Media 2014.**

PF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	TOTAL	Humedad
3,1	58,49	17,02	6,78	6,13	3,32	0,10	3,36	1,05	0,58	100,0	12,4

**Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio**

### 2.2.1.1.3 Mineral Silicio (SiO<sub>2</sub>)

El mineral de Sílice, conocido como corrector (debido a que corrige los bajos niveles de SiO<sub>2</sub> de la caliza y de la arcilla) aporta directamente la cantidad de óxido de sílice requerido para la formación de los silicatos que formarán parte del clinker.

En ciertas plantas de producción, donde los silicatos presentes en las calizas y minerales arcillosos son suficientes para completar la reacción la dosificación de los materiales correctores es mínima o ninguna dependiendo del diseño original del crudo.

**Tabla 3 Análisis Físico Químico Sílice Media 2014.**

PF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	TOTAL	Humedad
2,6	92,23	2,46	2,08	0,10	0,00	0,01	0,00	0,19	0,37	100,0	8,9

Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio

### 2.2.1.1.4 Mineral de Hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

El mineral de Hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), también conocido como corrector o material fundente se utiliza como fase líquida para provocar su fusión dentro del reactor y promover la sinterización de los carbonatos y silicatos a temperaturas más bajas constituyendo una fuente de eficiencia térmica y un vehículo catalítico para promover la reacción de sinterización de los demás minerales activos.

**Tabla 4 Análisis Físico Químico Hierro Media 2014.**

PF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	TOTAL	Humedad
-2,17	5,44	1,37	66,29	1,57	2,66	0,14	0,45	0,19	23,97	100,0	3,3

Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio

Dado que la fuente principal de estas materias primas es la explotación minera la variabilidad de la pureza de las mismas está determinada por la técnica de explotación y por la fuente geológica de las mismas; esta variación de la pureza es evidente al notar la presencia de óxidos cruzados, es decir la caliza también aporta minoritariamente con Sílice y Alúmina debido a su composición; al igual

que la Arcilla cuyo principal aporte es la Alúmina; aporta también Sílice y Mineral de Hierro, que está presente en su composición química.

Los demás elementos menores, presentes en el crudo son relativamente inocuos y no formarán parte del análisis aquí presentado.

Después de definir la proporción adecuada de cada materia prima de acuerdo a DUDA se puede concluir que el crudo está formado por:

- $\text{CaCO}_3$ , Carbonato de Calcio, el mismo que determinará la saturación de Calcio en la composición del crudo; En lenguaje cementero, el óxido de calcio,  $\text{CaO}$  se abrevia con la letra C.
- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , En el lenguaje cementero este óxido se abrevia con la letra A
- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , En el lenguaje cementero este óxido se abrevia con la letra F
- $\text{SiO}_2$ , En el lenguaje cementero este óxido se abrevia con la letra S.  
(DUDA, 1977, págs. 1-4)

A partir de estos componentes básicos se han desarrollado relaciones fundamentales de calidad entre las proporciones de estos; de manera que sea posible determinar la calidad o caracterización de la harina cruda.

Es ampliamente difundido en la industria modelos de optimización para minimizar el costo del crudo producido en función de las proporciones de calidad requeridas; en función de dichas relaciones.

#### **2.2.1.1.5 Relaciones del Crudo**

A partir de la mezcla proporcionada de las materias primas, pulverizadas y secas se obtiene el subproducto identificado como Harina Cruda, el diseño de la misma está supeditado a la disponibilidad de Materias Primas y Combustibles de la planta que fabricará el clinker pero principalmente dependerá de las características que se desea dar al clinker o cemento una vez sinterizado en el horno.

Este amplio tema no constituye parte de esta investigación, por lo que presentamos a continuación el análisis químico del crudo obtenido en el 2014, en el reactor en estudio.

Como se puede apreciar el contenido de calcio, se ha expresado en términos de óxido CaO de calcio en lugar de Carbonatos CaCO<sub>3</sub>, debido a que una vez en el reactor la pérdida al fuego de los carbonatos provenientes principalmente de las calizas y arcillas provocará la liberación de CO<sub>2</sub> en el proceso conocido como descarbonatación.

**Tabla 5 Análisis Químico de la Harina Cruda. .**

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ti <sub>2</sub> O	SUM
14,14	3,42	1,983	43,39	1,466	0,08	0,668	0,22273	0,161	65,5

**Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio**

Los elementos menores MgO, SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, y Ti<sub>2</sub>O, constituyen por si mismos elementos despreciables en la formación del clinker, que si bien pueden volverse son críticos en el proceso de producción del clinker, no producen interacciones significativas con el óxido de calcio y por tanto no afectan a la variabilidad de los factores del crudo ni sus relaciones

Las siguientes relaciones se utilizan para expresar la química del crudo en función de los resultados previsibles en el clinker.

### 2.2.1.2 Saturación de cal LSF

**Ecuación 1 Ecuación de Saturación de Cal (BATTHY, Javed I, 2004, pág. 73)**

$$LSF = \frac{100 * C}{2.8 * S + 1.18 * A + 0.65 * F}$$

Dónde:

C: Corresponde al % de masa de CaO presente en el crudo

S: Corresponde al % de masa de SiO<sub>2</sub> presente en el crudo

A: Corresponde al % de masa de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente en el crudo

F: Corresponde al % de masa de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente en el crudo

“El nivel de cal en un clinker se caracteriza por el grado de saturación por la cal debido a KUHL que lo definió como la relación existente entre el contenido real de cal en el clinker y el máximo que puede contener (caracteriza el nivel de cal en el clinker)” (Universidad de Oviedo, 2015)

Es decir la anterior fórmula expresa el contenido de cal del crudo una vez transformado en clinker sobre el máximo que podría contener si la reacción fuera perfecta.

Estas ecuaciones se derivan de los análisis químicos durante el desarrollo de esta industria.

### 2.2.1.3 Módulo de Sílice

**Ecuación 2 Ecuación del Módulo de Silicatos (BATTHY, Javed I, 2004, pág. 73)**

$$MS = \frac{S}{A + F}$$

Expresa la relación entre el contenido de sílice, expresado sobre la alúmina y el Hierro (DUDA, 1977, págs. 7-11); o expresado de otra forma como la relación entre el óxido de sílice y el contenido de fase líquida calculado para una temperatura de clinkerización de 1450°C

Dónde:

S: Corresponde al % de masa de SiO<sub>2</sub> presente en el crudo

A: Corresponde al % de masa de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente en el crudo

F: Corresponde al % de masa de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente en el crudo

### 2.2.1.4 Módulo de Alúmina

**Ecuación 3 Ecuación de Módulo de Alúmina (BATTHY, Javed I, 2004, pág. 73)**

$$MA = \frac{A}{F}$$

Describe la proporción de Alúmina en función del Hierro

“El módulo de alúmina caracteriza la composición de la fase líquida y, por tanto, sus propiedades, ya que a la temperatura existente en la zona de clinkerización ambos óxidos se encuentran, casi en su totalidad, contenidos en dicha fase valores crecientes del módulo de alúmina (por ejemplo, cantidades decrecientes de  $Fe_2O_3$  manteniendo constante el contenido de  $Al_2O_3$ ) y para una misma temperatura, traen consigo que la viscosidad de la fase líquida (fundido) sea mayor, por lo que disminuirá la movilidad iónica (difusión más difícil) y la facilidad a la cocción del crudo será peor, aumentando el consumo de combustible, ya que debe trabajarse a una mayor temperatura de cocción” (Universidad de Oviedo, 2015)

Dado que los aluminatos constituyen la fase intersticial del nuevo mineral este módulo describe la composición de las fases menores del clinker.

La industria usa estas relaciones para definir sus objetivos de calidad tanto en el crudo como en el clinker, usando como referencia una reacción perfecta el proceso de sinterización básicamente corresponde a una recombinación mineralógica de los mismos elementos cementeros identificados como C, S, A, F, por lo que las relaciones pueden usarse para caracterizar el clinker de forma idéntica a la utilizada para el crudo.

A continuación se muestra el mismo crudo promedio 2014, expresado en términos de sus relaciones químicas.

**Tabla 6 Crudo Promedio 2014 expresado en sus relaciones químicas.**

<b>SC</b>	<b>MS</b>	<b>MA</b>
96,7	2,6	1,7

**Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio**

En este punto se dispone del crudo realizado a partir de la trituración y combinación de materias primas conocidas. Una vez realizada la molienda el crudo es sometido a un proceso de homogenización con el fin de atenuar la desviación estándar de todos los componentes químicos, con especial énfasis en la Saturación de Cal.

En el proceso, este crudo se conoce como Crudo Horno, o crudo de alimentación al horno, únicamente es más estable en términos de desviación estándar tanto para los componentes químicos como para sus relaciones químicas o módulos de LSF, MS, y MA.

A continuación se muestran la caracterización del crudo Horno, así como sus relaciones químicas.

**Tabla 7 Análisis Químico Crudo Horno Promedio 2014.**

<b>SiO2</b>	<b>Al2O3</b>	<b>Fe2O3</b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO3</b>	<b>Na2O</b>	<b>K2O</b>	<b>Ti2O</b>	<b>SUM</b>
13,97	3,46	1,96	43,39	1,44	0,09	0,66	0,23	0,16	65,34

Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio

**Tabla 8 Relaciones Químicas Crudo Horno Promedio 2014.**

<b>SC</b>	<b>MS</b>	<b>MA</b>
97,6	2,6	1,8

Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio

### 2.2.1.5 Calcinación o sinterización

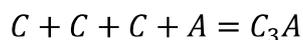
Una vez homogenizado el crudo horno ingresa al horno o reactor para el proceso de sinterización; El proceso garantiza la reacción y la combinación de los minerales.

En la primera etapa de cocción, conocida como descarbonatación, los carbonatos presentes en la caliza como  $\text{CaCO}_3$ , se descomponen en óxido de Calcio  $\text{CaO}$  y  $\text{CO}_2$ , el  $\text{CO}_2$ , se desprende en estado gaseoso quedando únicamente el óxido de Calcio, presente para combinarse con los demás elementos.

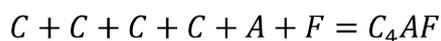
La combinación de  $\text{CaO}$  con el resto de elementos constituye la formación del clinker.

La primera en el rango de temperaturas entre 1260°C a 1338 °C

**Ecuación 4 Reacción de Formación Aluminato tri - cálcico**

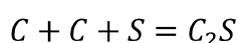


**Ecuación 5 Reacción de Formación Ferro Aluminato tetra - cálcico**

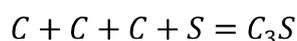


En el rango de temperaturas de 1338°C a 1420 °C

**Ecuación 6 Reacción de Formación Belita o Silicato Bi Cálcico**



**Ecuación 7 Reacción de Formación Alita o Silicato Tri Cálcico**



En conclusión, el clinker está compuesto por cuatro minerales producto de la reacción del CaO, con los demás minerales presentes en la Harina Cruda; 2 silicatos cálcicos y 2 aluminatos cálcicos. (DUDA, 1977, págs. 1-5)

**Tabla 9 Fases Mineralógicas del clinker**

<b>Símbolo Abreviado</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Nombre</b>
C <sub>3</sub> S	(CaO) <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>	Silicato Tricálcico o Alita
C <sub>2</sub> S	(CaO) <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	Silicato Bicálcico o Belita
C <sub>3</sub> A	(CaO) <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminato Tricálcico
C <sub>4</sub> AF	(CaO) <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ferro aluminato Tetracálcico

Tomado de (DUDA, 1977, págs. 1-5)

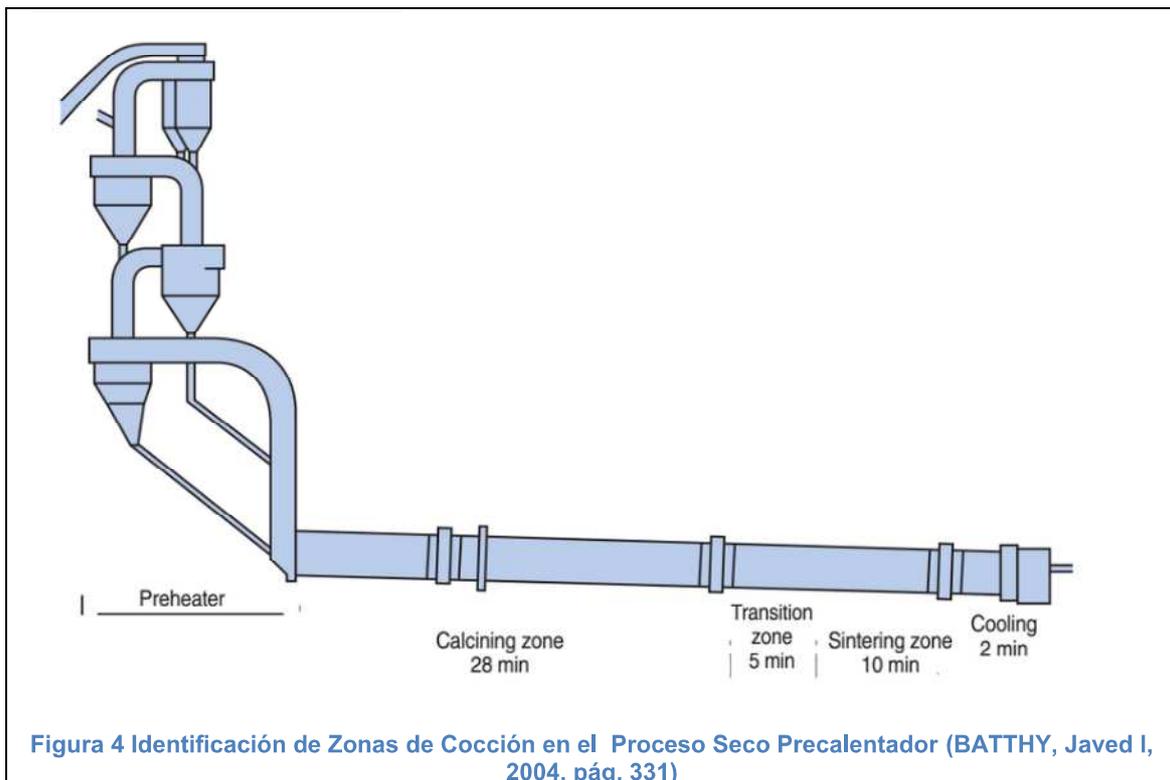
Aún con la reacción de clinkerización los componentes básicos del clinker son los mismos que forman parte de la harina de alimentación, es decir; la cantidad de C, A, F y S, presentes en el Crudo antes de la reacción es igual a las proporciones de estos elementos en el clinker.

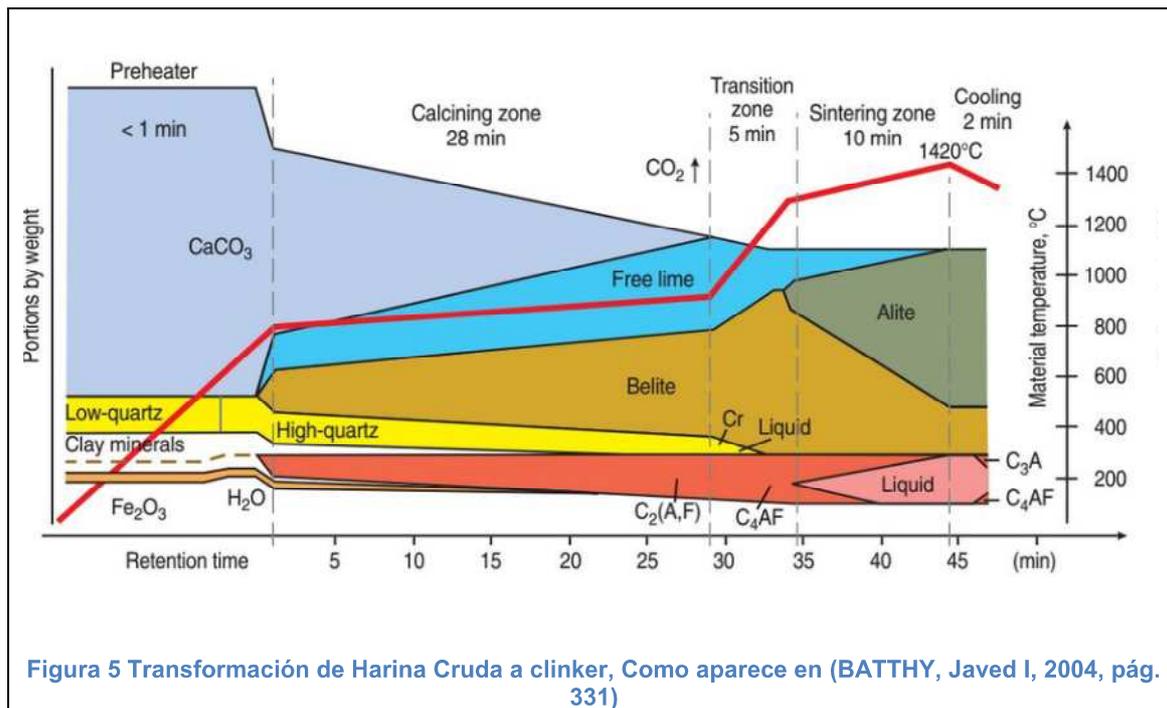
Esto quiere decir que el cambio en las fases minerales no afecta la composición química del clinker resultante, Dado que la única pérdida sufrida en el proceso ha sido la de carbonatación del  $\text{CO}_2$ , presente en los carbonatos de la caliza.

Con este criterio es evidente que las relaciones del crudo, LSF; MS; y MA son calculables y por tanto deben ser idénticas a las medidas o calculadas en el crudo de alimentación.

Es decir en una reacción perfecta, un crudo de LSF: 97,6 MS de 2.6 y MA de 1.8; debe producir un clinker de LSF: 97,6 MS de 2.6 y MA de 1.8

Sin embargo en el proceso industrial real es imposible tener una reacción perfecta esto quiere decir que habrá algo de C. que no se ha combinado con S, A, o F; esto se conoce como Cal libre y está presente en las fases minerales del clinker.





La descripción progresiva de las reacciones la ilustra BATTHY en los gráficos anteriores utilizando las zonas de cocción de un horno rotativo para mostrar el orden de las reacciones requeridas para la conformación del clinker; en el que se aprecia los carbonatos totales ( $\text{CaCO}_3$ ) proveniente principalmente de la caliza, el  $\text{SiO}_2$ , como (Low Quartz) proveniente del mineral de sílice pero también de los minerales arcillosos o (Clay minerals). Se puede ver el también el óxido de Hierro como ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) contenida en todas las materias primas naturales.

#### 2.2.1.5.1 Zona de Pre calentamiento

Secado de la mezcla conocida como Crudo Horno e inicio de la descarbonatación de los calcáreos.

#### 2.2.1.5.2 Zona de Descarbonatación

En el primer período del proceso identificado como (Calcining Zone) se puede observar claramente el desprendimiento del  $\text{CO}_2$  gaseoso en proceso de descarbonatación; este proceso inicia la aparición de ( $\text{CaO}$ ) Óxido de Cal o cal libre; la misma que empieza a reaccionar con los demás minerales para formar inicialmente  $\text{C}_2\text{AF}$ , y Belite;  $\text{C}_2\text{S}$ . Belita

### 2.2.1.5.3 Zona de Transición

Una vez completada la descarbonatación de los calcáreos, existe disponible el máximo de óxido de Calcio para la reacción; en este momento empieza la zona de transición la misma que se caracteriza por extinguir completamente los minerales de Sílice pues la reacción de C2S o Belita es máxima en esta fase.

### 2.2.1.5.4 Zona de Sinterización

EL C2S se combina con la CaO residual para formar la alita, (Alite) o C3S; extinguendo al máximo el CaO.

Después de esta fase se ha completado la formación de los 4 minerales principales que forman el clinker,

La gráfico ilustra una reacción perfecta sin embargo en términos prácticos siempre existirá CaO libre o Cal libre residual no combinada en el clinker; Este es un indicador muy importante de la eficiencia de la reacción.

Tabla 10 Reacciones básicas del clinker

Materias Primas	Crudo Inerte	Cocción	
		Clinker	Pérdida
Sílice	SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> A	CO <sub>2</sub>
Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	
Arcilla	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> S	
Caliza	CaCO <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> S	
		CaO	

### 2.2.1.5.5 La Cal libre CL o CaO

Se ha remarcado especialmente la cal libre debido a que constituye un indicador de la eficiencia de la reacción y por tanto según lo describen lo

apuntes de ingeniería de Materiales de la Universidad de Oviedo es un indicador de la quemabilidad del crudo, por tanto es un indicador de la aptitud a la cocción de un crudo (burnability) conceptualmente indica la mayor o menor dificultad para que se produzca la transferencia de materia entre sus constituyentes, para formar los compuestos del clinker (Universidad de Oviedo, 2015)

Por convección; ésta se mide por la presencia de cal libre (CaO<sub>l</sub>) presente después de la cocción del crudo durante un cierto tiempo ( $\theta$ ) a una temperatura determinada (t), es decir:

**Ecuación 8 Proporcionalidad de la cal libre, expresada como función de la temperatura y el tiempo (Universidad de Oviedo, 2015)**

$$CaO_l = f(\theta, t)$$

Al ser una consecuencia de la aptitud de quema de la harina cruda constituye un potente indicador para la operación del horno, pues le permitirá ajustar al operador en el horno el tiempo de residencia dentro del horno rotativo y la temperatura a la que está sometida la mezcla a través del control de combustible del proceso.

Las plantas industriales usan esta medición dentro de sus planes de calidad con una frecuencia alta de acuerdo a la estabilidad del proceso, estos períodos van desde mediciones en línea, has periodos de 2 y 4 horas. “Las fases constituyentes del clinker se pueden determinar cualitativamente y en gran medida cuantitativamente mediante análisis difractométrico (difractometría de rayos x) La determinación cuantitativa por este medio ha alcanzado hasta ahora gran importancia práctica desde el punto de vista del control de fabricación.” (LABAHN Otto, 1985, pág. 188)

#### **2.2.1.5.6 El silicato Tricálcico C<sub>3</sub>S**

Los componentes mineralógicos pueden utilizarse directamente utilizando las fórmulas de Bogue (DUDA, 1977, pág. 7):

**Ecuación 9 Ecuación de Bogue para cálculo del C3S**

$$C_3S = 4,071 \times C - 7,60 \times S - 6,718 \times A - 1,43 \times F - 2,852 \times SO_3$$

**Ecuación 10 Ecuación de Bogue para el cálculo de C2S**

$$C_2S = 2,867 \times S - 0,7544 \times C_3S$$

**Ecuación 11 Ecuación de Bogue para el cálculo de C3A**

$$C_3A = 2,65 \times A - 1,692 \times F$$

**Ecuación 12 Ecuación de Bogue para el cálculo de C4AF**

$$C_4AF = 3,043 \times F$$

Dónde:

C: es el contenido en masa seca del porcentaje de CaO en la masa decarbonatada de crudo.

S: es el contenido en masa seca del porcentaje de SiO<sub>2</sub> en la masa decarbonatada de crudo.

F: Es el contenido en masa seca del porcentaje de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la masa decarbonatada de crudo

A: es el contenido en masa seca del porcentaje de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la masa decarbonatada de crudo

La ecuación de C<sub>3</sub>S; determinará el máximo potencial de C<sub>3</sub>S en la reacción pues considera una combinación total de la CaO presente en la composición.

Dado que la Cal libre es un parámetro de control clásico en la fabricación de cemento se puede modificar la fórmula de C<sub>3</sub>S en crudo para encontrar el C<sub>3</sub>S real en el clinker si descontamos del CaO total la cal libre que es medida en el clinker. Obteniéndose de esta forma el C<sub>3</sub>SCK, (C<sub>3</sub>S presente en el clinker)

**Ecuación 13 Cálculo del C3S presente en el clinker**

$$C_3S = 4,071 \times (C - CaO_l) - 7,60 \times S - 6,718 \times A - 1,43 \times F - 2,852 \times SO_3$$

Este mineral es el más importante en la composición del clinker por lo que los objetivos de calidad de las empresas de producción de cemento están determinados por este importante indicado cuantitativo; calculado a partir de la formación del crudo (su análisis Químico) y de la medida de la eficiencia de la reacción a través de la medición de Cal libre.

### 2.2.1.6 Molienda de Cemento.

La Molienda de cemento constituye el proceso más simple, en la elaboración del producto final; dado el poco impacto que posee en el alcance de este estudio, se muestra a continuación una breve descripción del mismo.

Una vez obtenido el clinker, constituido por la reacción de sinterización sobre el crudo decarbonatado; este es enfriado y almacenado.

Este producto es finamente molido con puzolana natural y yeso natural.

Las puzolanas naturales disponibles en la región andina son ricas en silicatos y aluminatos; por lo que son reactivas en contacto con el clinker debido a la presencia de CaO, y Agua en la reacción hidráulica del Cemento.

El proceso de Molienda utiliza molinos verticales o de bolas; la industria persigue la eficiencia en términos de energía eléctrica requerida para alcanzar la finura o superficie específica establecida como requisito de calidad en el desarrollo del producto.

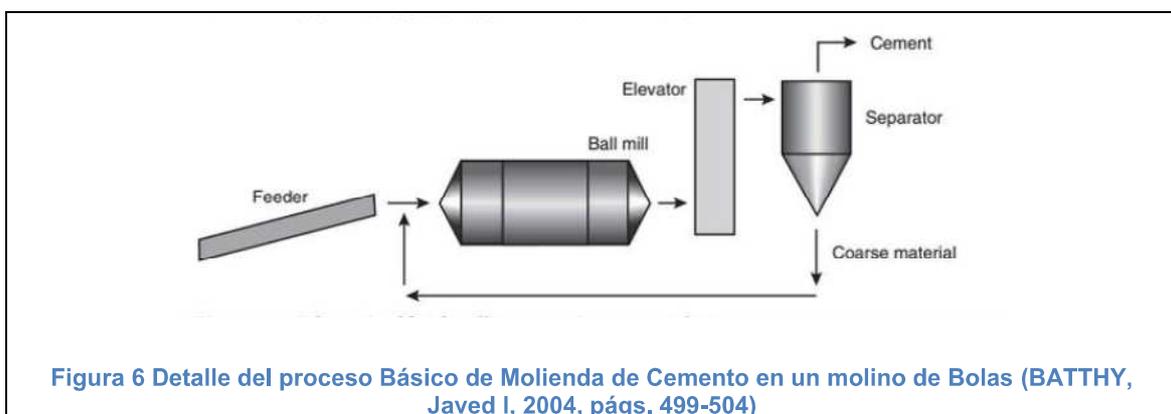


Figura 6 Detalle del proceso Básico de Molienda de Cemento en un molino de Bolas (BATTY, Javed I, 2004, págs. 499-504)



Figura 7 Detalle de interior molino de Bolas (BATTHY, Javed I, 2004, págs. 499-504)



Figura 8 Molinos de bolas en planta de Producción de Cemento (BATTHY, Javed I, 2004, págs. 499-504)

## CAPÍTULO 3.

### 3 Representación de datos históricos de Harina de Alimentación y Horno de Clinker.

Hasta el momento, se ha determinado la composición de la harina cruda a partir de la composición química de las materias primas.

Una vez determinado el crudo este ha sido homogenizado, únicamente con el fin de reducir las variaciones en finura y composición química.

Después de homogenizado ha sido inyectado al proceso de Clinkerización realizado por el Horno –reactor.

Paralelamente se dispone del análisis de Cal libre como herramienta para medir la eficiencia de la reacción y estimar los niveles de C3S presentes en el clinker.

En el siguiente flujograma se describe el proceso completo con el orden de las reacciones y los aportes que realiza cada materia prima

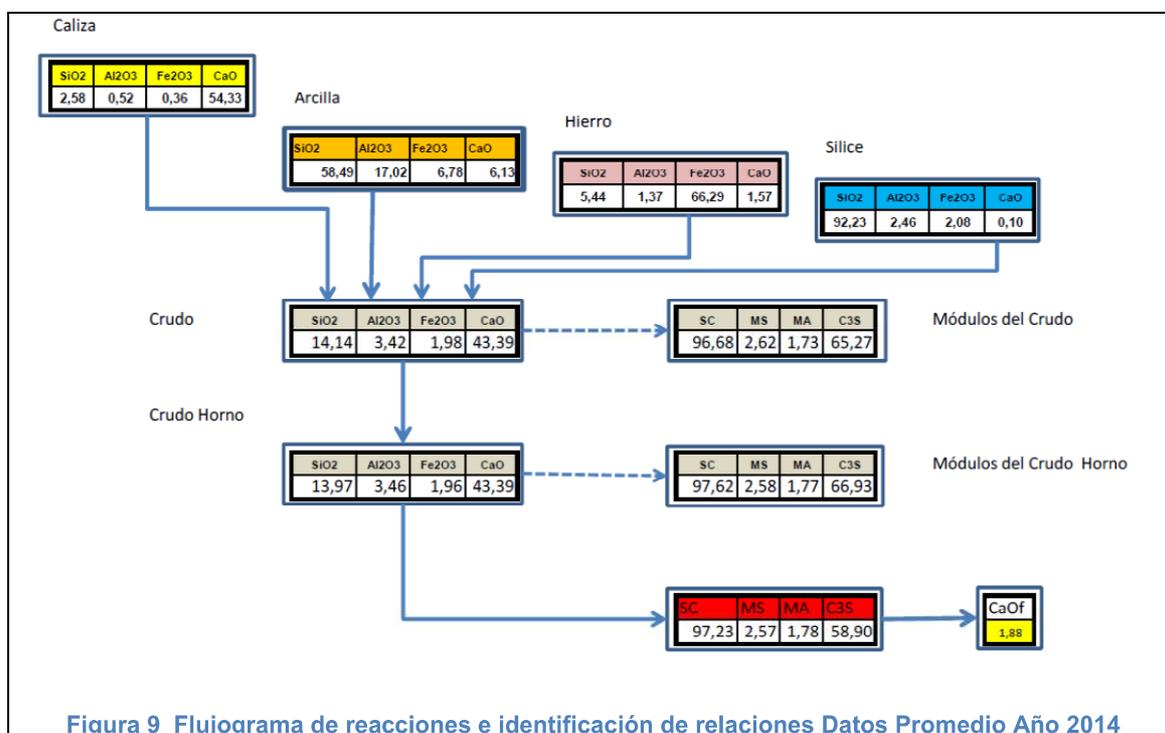


Figura 9 Flujograma de reacciones e identificación de relaciones Datos Promedio Año 2014

Los datos contenidos en el flujograma muestran consistencia con lo esperado dado que se trata de la media de valores producidos durante todo el año 2014; el plan de calidad especifica un muestreo de clinker y crudo horno de cada 6 horas, mientras esté en operación, el equipo.

El Horno - reactor en promedio operó en el año 2014 un total de 7700 horas; es decir con una utilización del 85%, sobre el período anual disponible de 8760 horas lo que supone en promedio 1200 análisis en el año. Por tanto los datos promedio son los resultantes son la media de estos 1200 análisis.

Podemos concluir que el C3S resultante en el clinker es función de la Cal libre CaO resultante del proceso térmico de reacción.

**Ecuación 14 Función de Proporcionalidad de la Cal libre con el C3S Clinker**

$$C_3S \text{ Clinker} = f(CaO_l)$$

Y a su vez también función de la Saturación de Cal en el crudo horno o harina de alimentación; la misma que puede expresarse en términos de su C3S potencial, (con la presunción de CaO libre=0) debido a que el C3S potencial en el crudo (para una CaO libre =0), es función del contenido de CaO en el mismo.

**Ecuación 15 Función de Proporcionalidad de las materias primas del C3S Clinker**

$$C_3S \text{ Clinker} \approx f(C_3S \text{ Crudo Horno})$$

Al componer ambas proporcionalidades tenemos la base para crear el modelo; pues deberá tener como entradas la características químicas de la materia prima y la también la acción del proceso a través de la capacidad del mismo para generar la reacción y por tanto entregar Cal Libre.

**Ecuación 16 Función de Proporcionalidad compuesta del C3S Clinker**

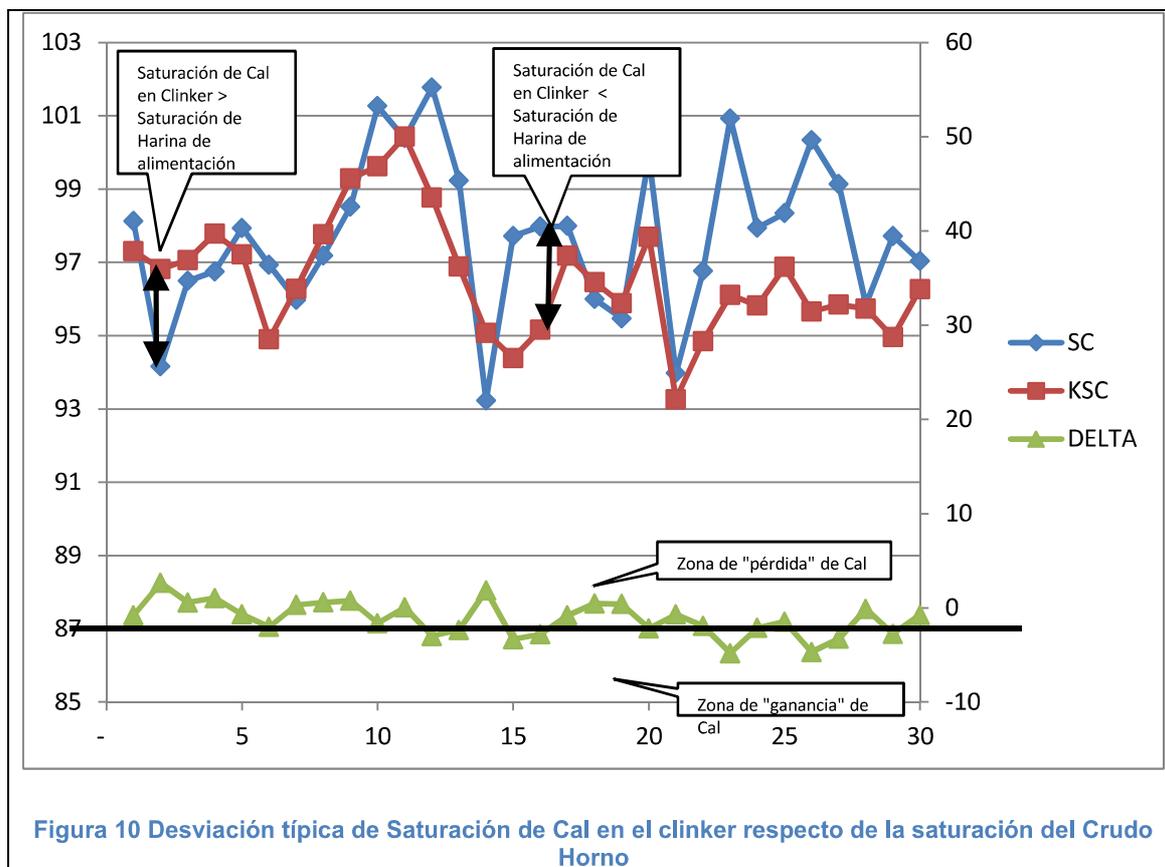
$$C_3S \text{ Clinker} = f(CaO_l, C_3S \text{ Crudo Horno})$$

Por tanto la Saturación del Cal o LSF resultante en el clinker es función del C3S de la harina de alimentación; y de la Cal libre que el proceso pueda imprimir.

Basado en la descripción de las reacciones; el LSF del clinker debe ser idéntico al LSF del crudo horno; sin embargo en la realidad esto no siempre se cumple, típicamente se produce una separación de estos dos índices sea aditiva o diferencial (es decir la LSF del clinker puede incrementarse varios puntos sobre el LSF del Crudo Horno), Saliéndose del objetivo de control, lo que puede llevar a corregir la formulación del crudo para "alcanzar" el objetivo de calidad nuevamente, una vez alcanzado este objetivo se vuelven a producir variaciones lo que desestabiliza el control químico de la reacción, impactando en la estabilidad de la producción del clinker.

El origen de estas variaciones suele ser atribuible a errores de muestreo, interferencias del proceso, Como paros cortos por fallas de fiabilidad o inclusive por errores humanos en la repetitividad de los ensayos químicos.

A continuación se describe una diferencia de saturación típica en la producción de clinker.



Con el fin de ilustrar las variaciones; en el gráfico anterior se han tomado 30 registros consecutivos de la harina de alimentación y del clinker producido con ella, acotando la diferencia que se produce con respecto a la obtenida en el clinker. Como se puede ver en el gráfico la diferencia (DELTA) cambia de signo, pasando de aditiva en la “zona de ganancia de calcio” a diferencial en la “zona de pérdida de calcio”; cabe indicar que no existe ganancia de calcio en el proceso; sin embargo esta perturbación impacta en los resultados de calidad y en la estabilidad requerida para el correcto control del proceso.

### 3.1 Crudo Horno, o Harina de Alimentación

Se disponen de datos de 2 años de operación del Horno que será base del presente estudio esto implica 1992 datos o registros SC o LSF de la Harina de alimentación, así como sus relaciones químicas de Módulo de Sílice, Modulo de Alúmina y C3S potencial; aquí se presenta un extracto de la base datos de entrada; así como la estadística descriptiva de cada variable.

Tabla 11 Datos Crudo Horno 2012- 2013

Registro	Crudo Horno			
	SC	MS	MA	C3S
1	98,12	2,48	1,70	68,77
2	94,16	2,55	1,75	59,88
3	96,49	2,51	1,65	65,51
.....	.....	.....	.....	.....
1990	95,06	2,61	1,80	61,65
1991	96,27	2,59	1,78	64,35
1992	97,80	2,59	1,78	67,56

Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio

Tabla 12 Estadística Descriptiva Crudo Horno

<i>Parámetro</i>	<i>SC</i>	<i>MS</i>	<i>MA</i>	<i>C3S</i>
Media	98,63	2,52	1,83	68,31
Error típico	0,05	0,00	0,00	0,10
Mediana	98,62	2,51	1,83	68,45
Moda	99,50	2,50	1,77	69,37
<b>Desviación estándar</b>	<b>2,18</b>	<b>0,06</b>	<b>0,07</b>	<b>4,63</b>
Varianza de la muestra	4,77	0,00	0,01	21,44
Curtosis	2,83	0,64	2,66	4,35
Coefficiente de asimetría	-0,30	0,52	-0,27	-0,60
Rango	23,44	0,56	0,89	53,27
<i>Parámetro</i>	<i>SC</i>	<i>MS</i>	<i>MA</i>	<i>C3S</i>
Mínimo	83,23	2,20	1,27	31,21
Máximo	106,67	2,76	2,16	84,48
Cuenta	1992	1992	1992	1992

#### Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio

Para presentar la variabilidad de la harina de alimentación al horno se realizará un ajuste de distribución estadístico a partir de los 1992 registros utilizando el software @Risk, EL criterio de selección para el ajuste será la bondad de ajuste será la bondad del mismo a través del parámetro estadístico chi cuadrado.

Esta variabilidad se expresará en forma de una distribución estadística seleccionada a partir de la prueba de bondad de ajuste

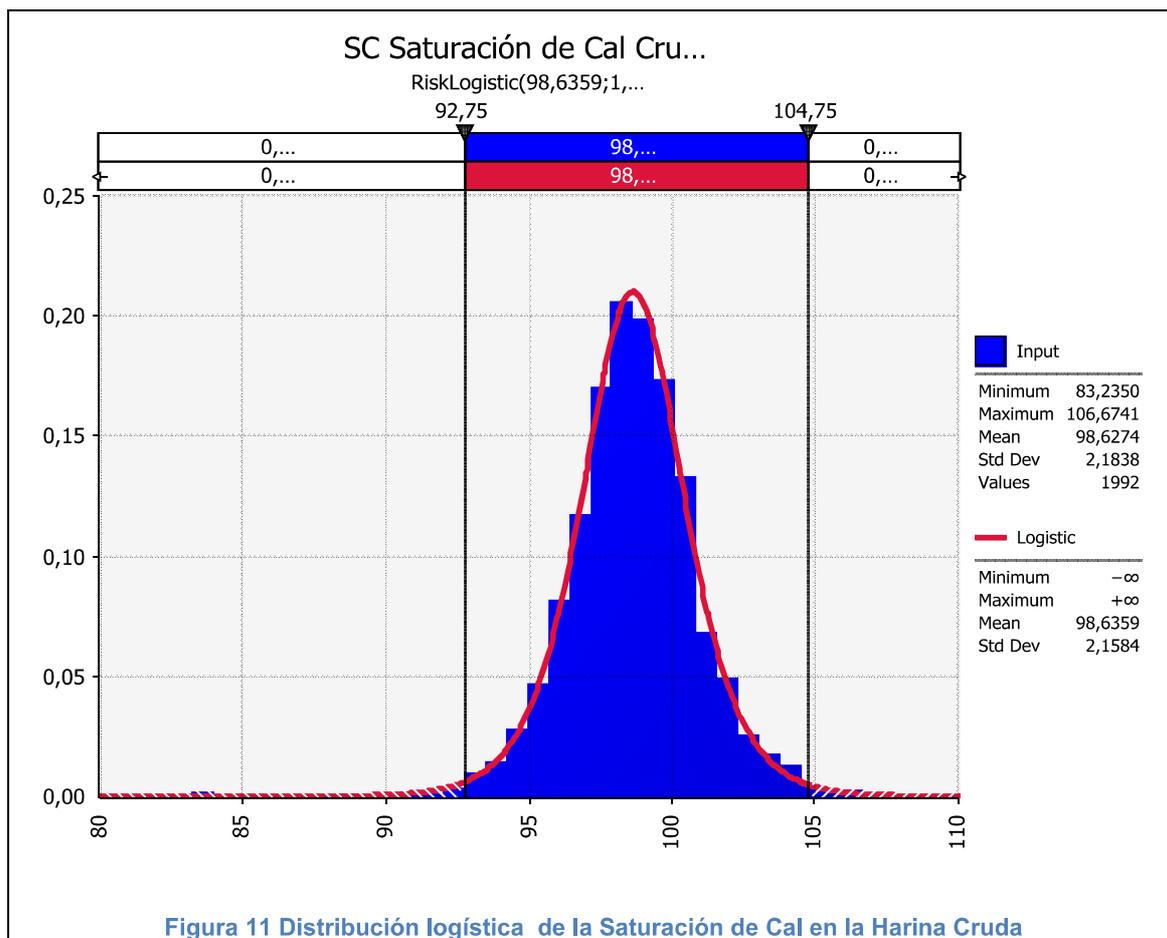
#### 3.1.1 Ajuste de Distribución de la SC Saturación de cal en el crudo

Una vez realizada la corrida de ajuste el sistema arroja una distribución del tipo logística estadística “En teoría de la probabilidad y la estadística, la distribución logística es una distribución de probabilidad continua. Su función de distribución acumulativa es la función logística, que aparece en la regresión logística y redes neuronales. Se asemeja a la distribución normal en forma, pero tiene colas más pesadas” (Campodocs, 2015)

El Chi cuadrado resultante de este ajuste es de 31,92

**Los parámetros de la distribución son:**

Tipo: Logística; Media: 98,6 y Desviación estándar de 2,158



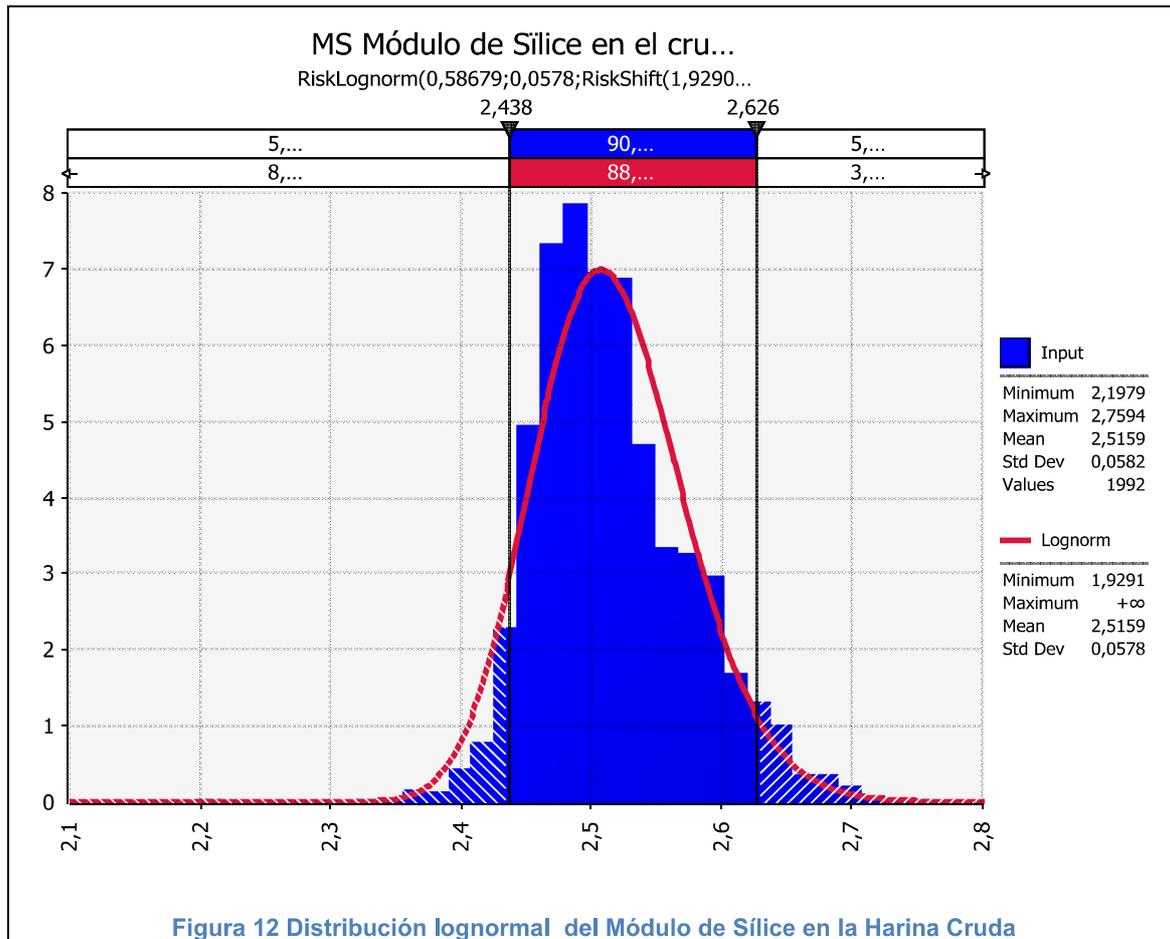
### 3.1.2 Ajuste de Distribución del MS Módulo de Sílice en Crudo

Una vez realizada la corrida de ajuste el sistema arroja una distribución del tipo lognormal “Ocurre en la práctica cada vez que existe una variable aleatoria X tal que su logaritmo natural es una nueva variable aleatoria Y con distribución normal, entonces X sigue el modelo probabilístico llamado logaritmo normal” (Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2015)

El Chi cuadrado resultante de este ajuste es de 119,99

**Los parámetros de la distribución son:**

Tipo: LogNormal; Media: 98,6 y Desviación estándar de 2,158



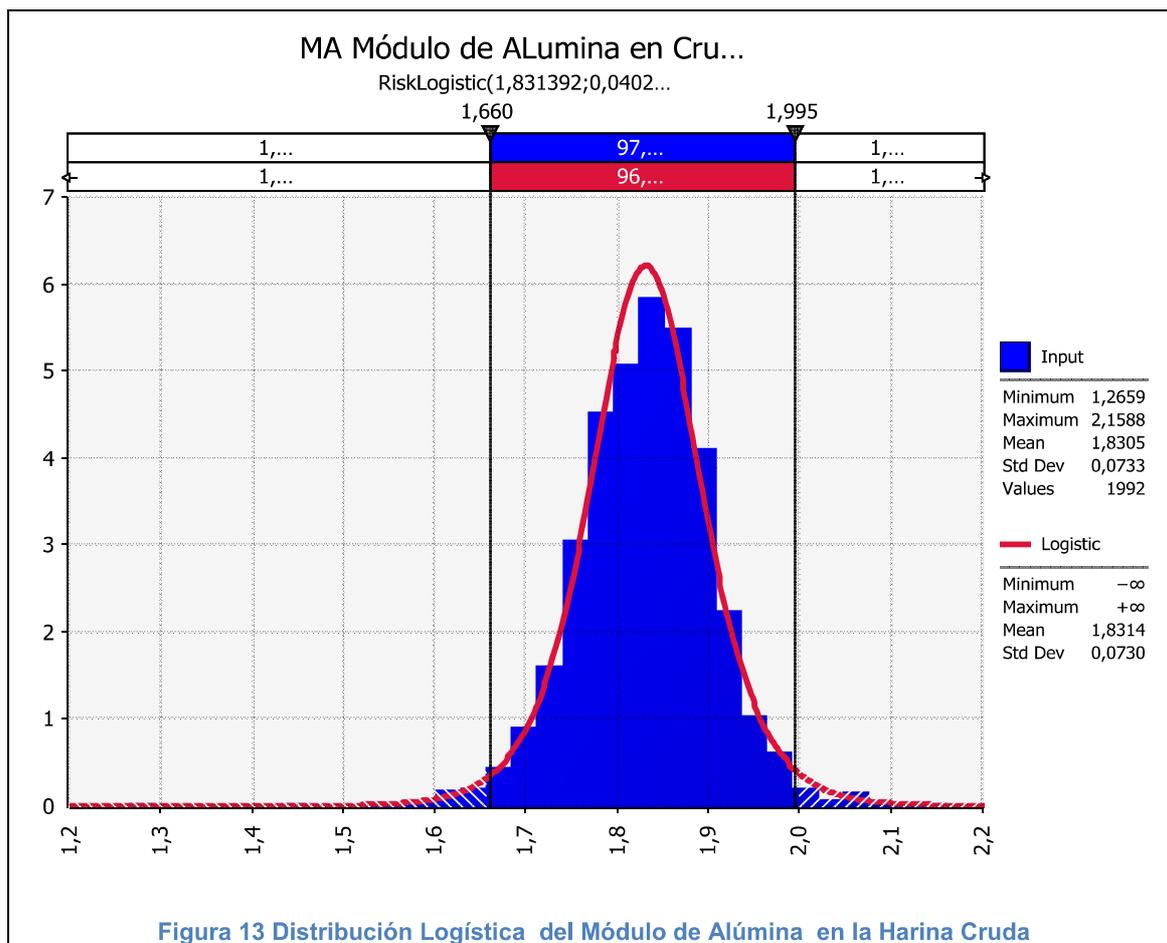
### 3.1.3 Ajuste de Distribución del MA Módulo de Alúmina en Crudo

Una vez realizada la corrida de ajuste el sistema arroja una distribución del tipo logística

El Chi cuadrado resultante de este ajuste es de 61.843

**Los parámetros de la distribución son:**

Tipo: Logística; Media: 1,8314 y Desviación estándar de 0,073



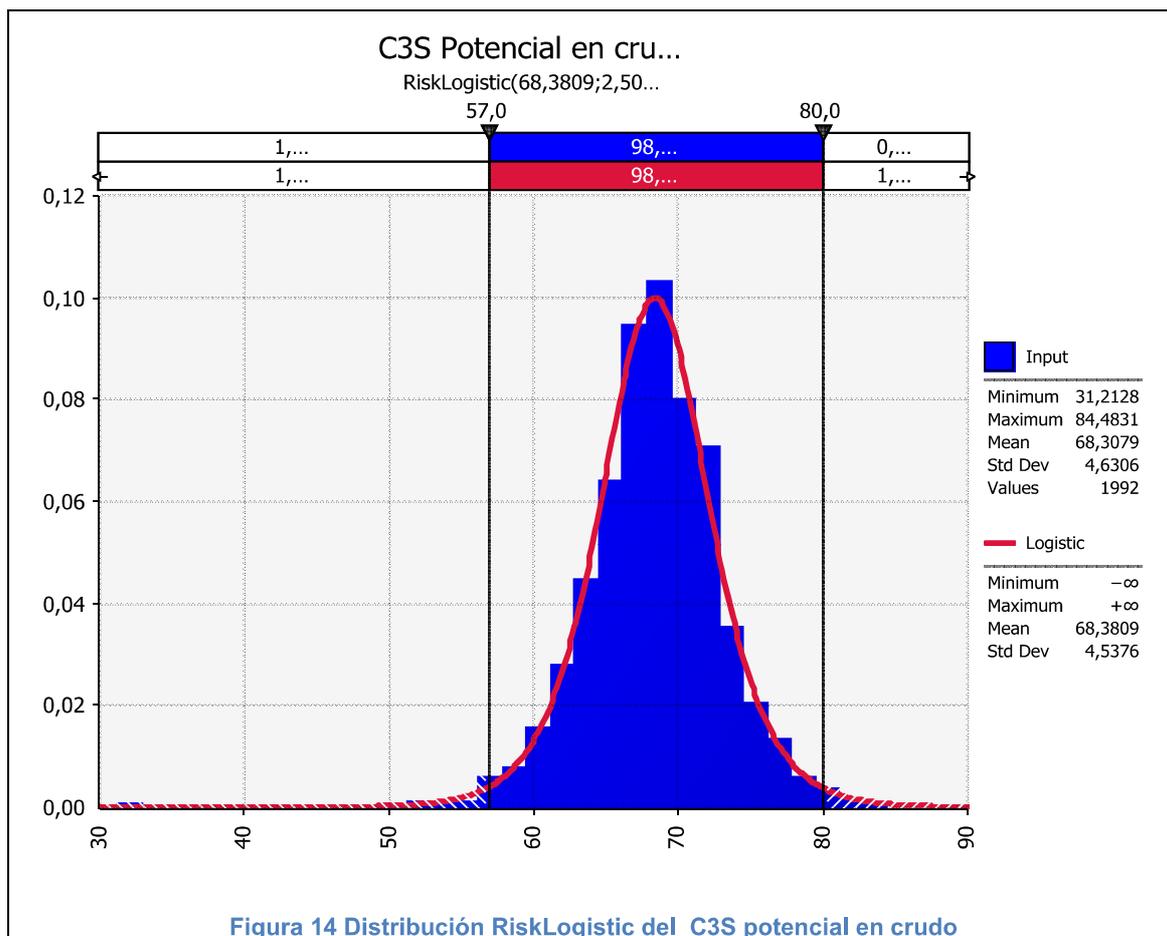
### 3.1.4 Ajuste de Distribución del C3S Potencial en el Crudo

Una vez realizada la corrida de ajuste el sistema arroja una distribución del tipo logística

El Chi cuadrado resultante de este ajuste es de 30.099

**Los parámetros de la distribución son:**

Tipo: Logística; Media: 68,38 y Desviación estándar de 4,536



### 3.2 Clinker producido a partir del Crudo Horno, o Harina de Alimentación

Se disponen de datos de 2 años de operación del Horno equivalentes a 1992 datos o registros (KSC) o Saturación de cal del clinker producido así como sus relaciones químicas de (KMS) Módulo de Sílice, (KMA) Modulo de Alúmina (KMA) y C3S Real (KC3S); adicionalmente se dispone de la Cal libre medida en cada muestra (C.L.); se presenta en la siguiente tabla un extracto de la base datos de entrada; y posteriormente la estadística descriptiva de cada variable y la distribución a la que estas se ajustan.

Tabla 13 Registros de clinker producido

Registro	KSC	KMS	KMA	KC3S	C.L
1	97,31	2,53	1,76	58,54	1,10
2	96,81	2,52	1,79	59,99	1,40
3	97,06	2,55	1,75	60,45	1,60
.....	.....	.....	.....	.....	.....
1992	95,30	2,60	1,76	57,40	1,14

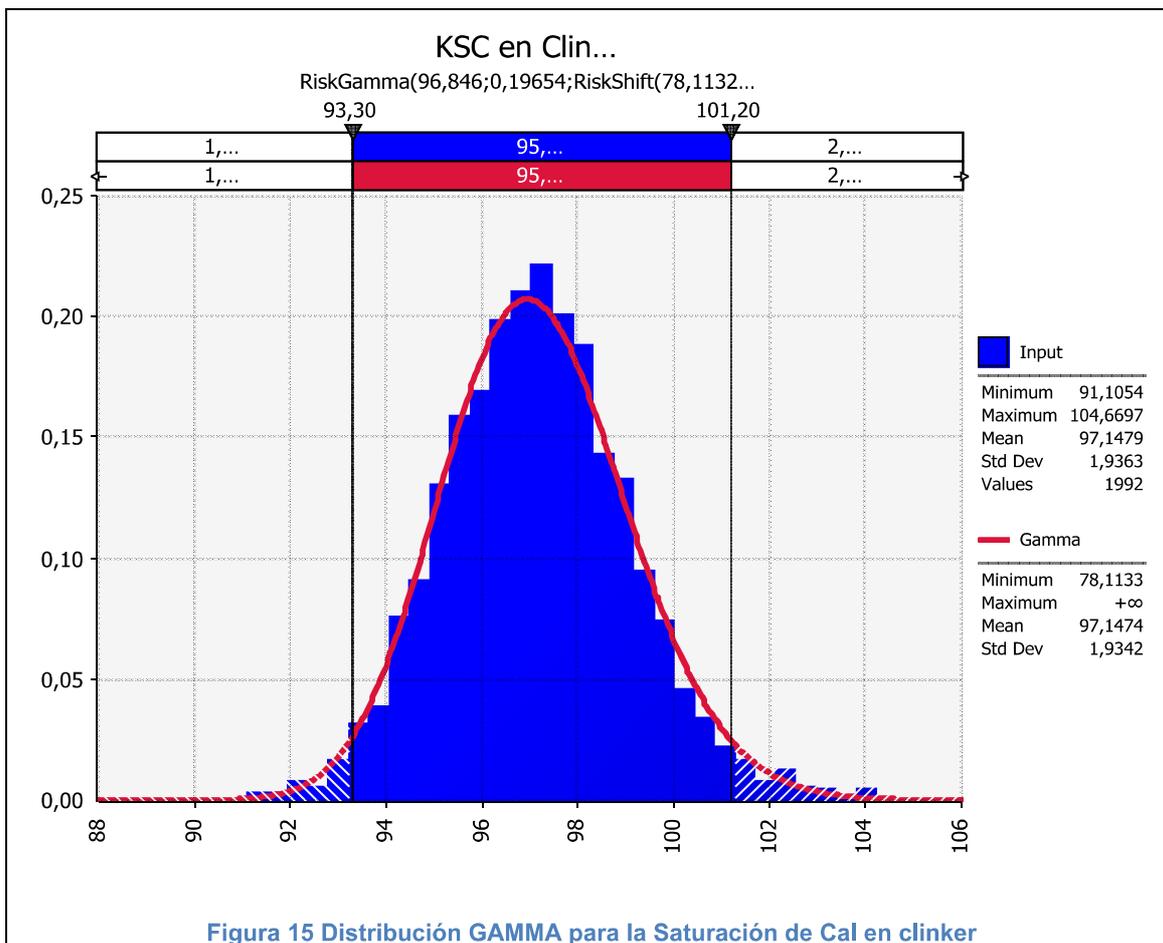
Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio

Tabla 14 Estadística Descriptiva Clinker Producido a partir del Crudo Horno.

<i>Parámetro</i>	<i>KSC</i>	<i>KMS</i>	<i>KMA</i>	<i>KC3S</i>	<i>C.L</i>
Media	97,15	2,51	1,76	57,96	1,88
Error típico	0,04	0,00	0,00	0,05	0,02
Mediana	97,10	2,51	1,76	58,28	1,85
Moda	93,27	2,50	1,76	50,64	1,90
Desviación estándar	1,94	0,06	0,01	2,34	0,89
Varianza de la muestra	3,75	0,00	0,00	5,49	0,78
Curtosis	0,44	0,91	75,75	2,95	0,71
Coficiente de asimetría	0,25	0,23	-7,26	-1,19	0,59
Rango	13,56	0,53	0,20	20,67	6,05
Mínimo	91,11	2,20	1,63	44,44	0,15
Máximo	104,67	2,73	1,83	65,12	6,20
Cuenta	1992	1992	1992	1992	1992

Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio.

### 3.2.1 Ajuste de Distribución de la KSC Saturación de cal en el clinker



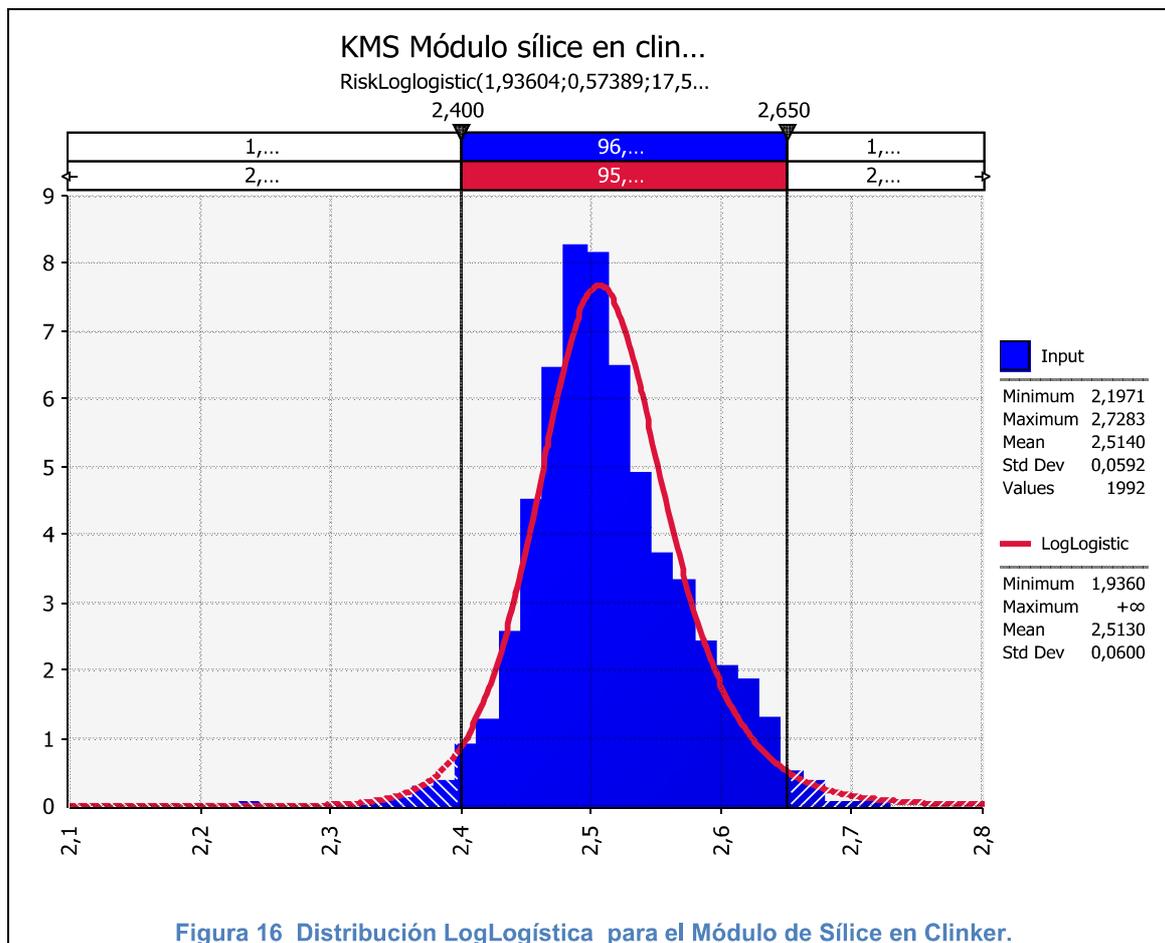
Una vez realizada la corrida de ajuste el sistema arroja una distribución del tipo Gamma “Una variable aleatoria X asociada a un experimento aleatorio tiene una distribución GAMMA” (Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2015)

El Chi cuadrado resultante de este ajuste es de 31,733

**Los parámetros de la distribución son:**

Tipo: Gamma; Media: 97,14 y Desviación estándar de 1,943

### 3.2.2 Ajuste de Distribución KMS Módulo de sílice en el clinker



Una vez realizada la corrida de ajuste el software arroja una distribución del tipo LogLogística. “En probabilidad y estadística, la distribución log-logística es una distribución de probabilidad continua de una variable aleatoria no negativa. Se utiliza en el análisis de supervivencia como un modelo paramétrico para eventos cuya tasa aumenta inicialmente y disminuye después, por ejemplo, la mortalidad por cáncer tras el diagnóstico o el tratamiento. También se ha utilizado en la hidrología de caudal modelo y precipitación, y en la economía como un modelo simple de la distribución de la riqueza o los ingresos. La distribución log-logística es la distribución de probabilidad de una variable aleatoria cuyo logaritmo tiene una distribución logística. Es similar en forma a la distribución logarítmica normal, pero tiene colas más pesadas. Su función de distribución acumulativa se puede escribir en forma cerrada, a diferencia de la de inicio de sesión normal” (Campodocs, 2015).

El Chi cuadrado resultante de este ajuste es de 103,97

**Los parámetros de la distribución son:**

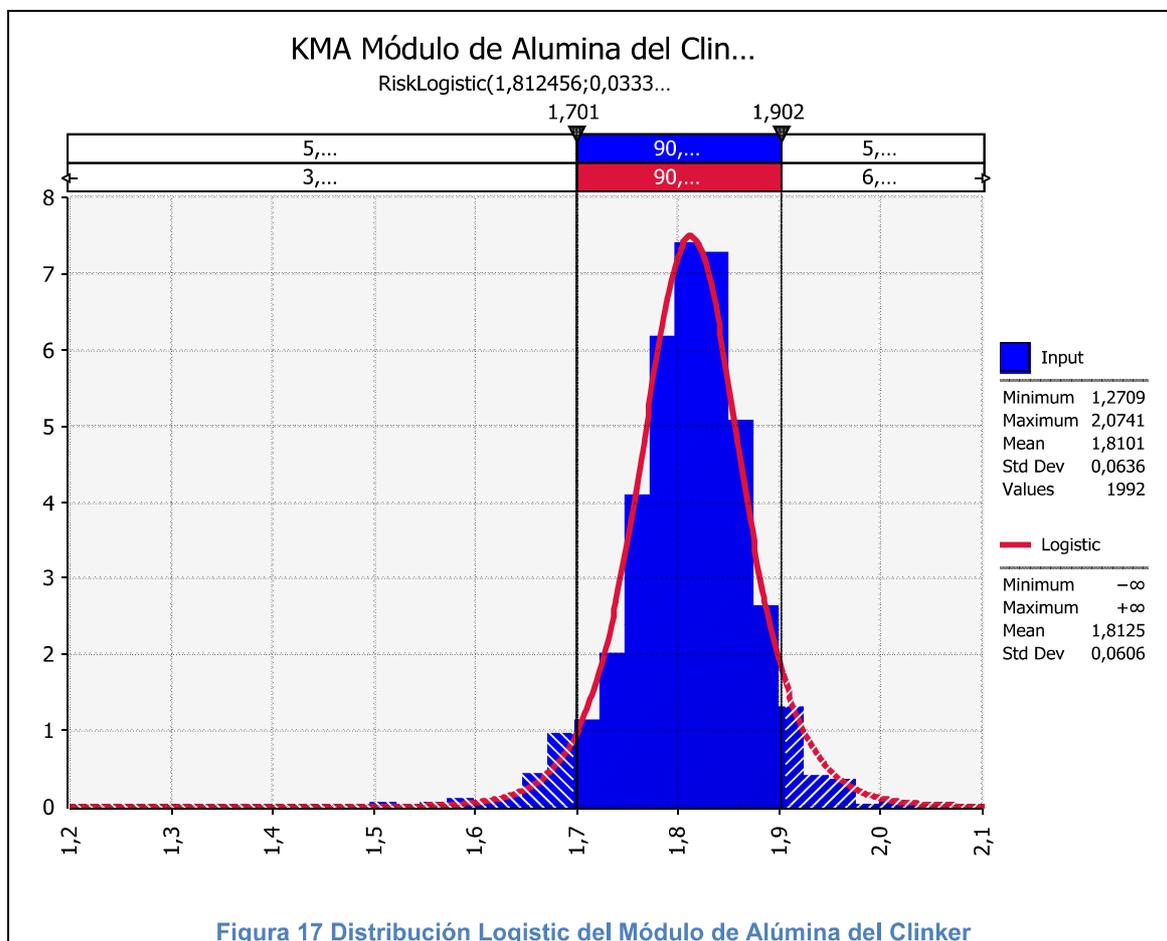
Tipo: LogLogistica; Media: 2,513 y Desviación estándar de 0,06

### 3.2.3 Ajuste de Distribución KMA Módulo de Alúmina en el clinker

El Chi cuadrado resultante de este ajuste es de 66,30

**Los parámetros de la distribución son:**

Tipo: Logística; Media: 1,8125 y Desviación estándar de 0,060



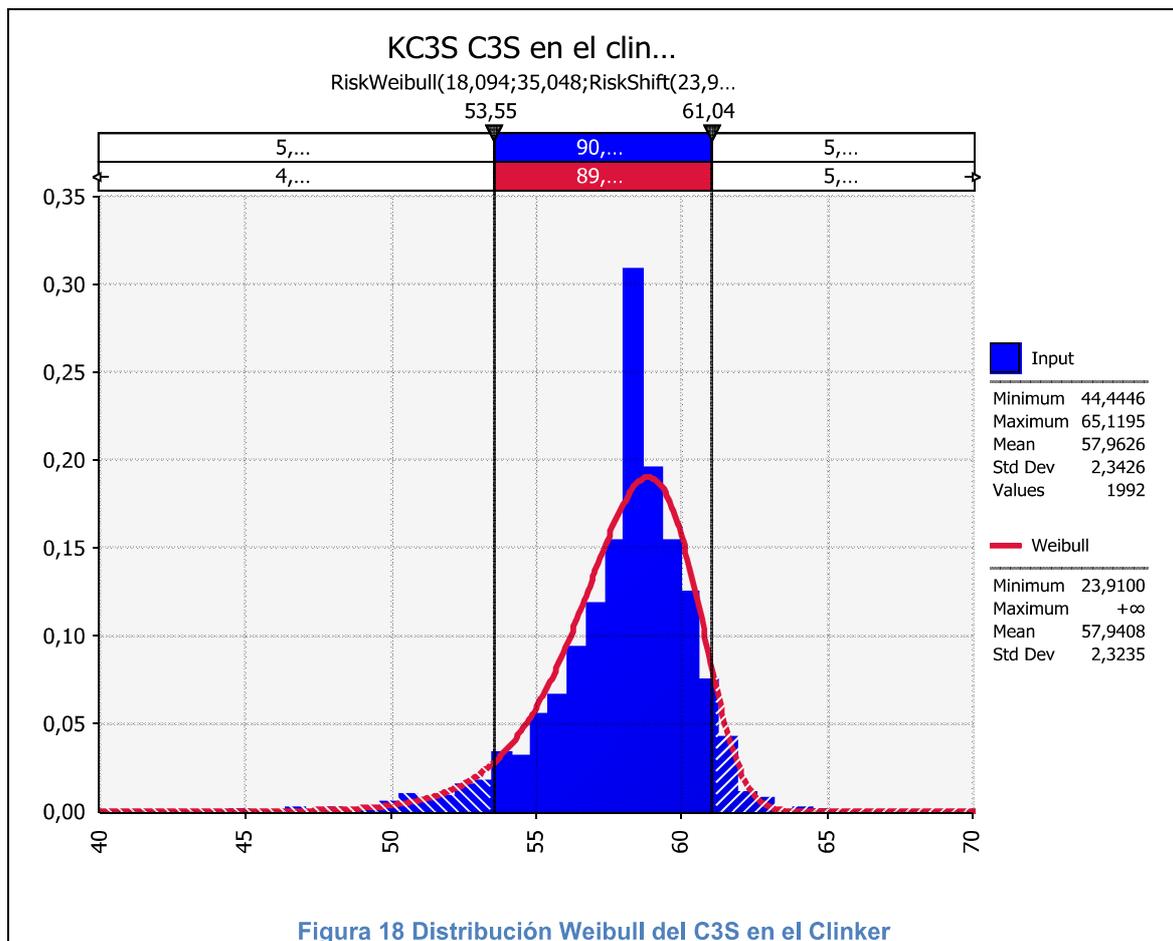
### 3.2.4 Ajuste de Distribución KC3S; C3S en el clinker

El Chi cuadrado resultante de este ajuste es de 187,93

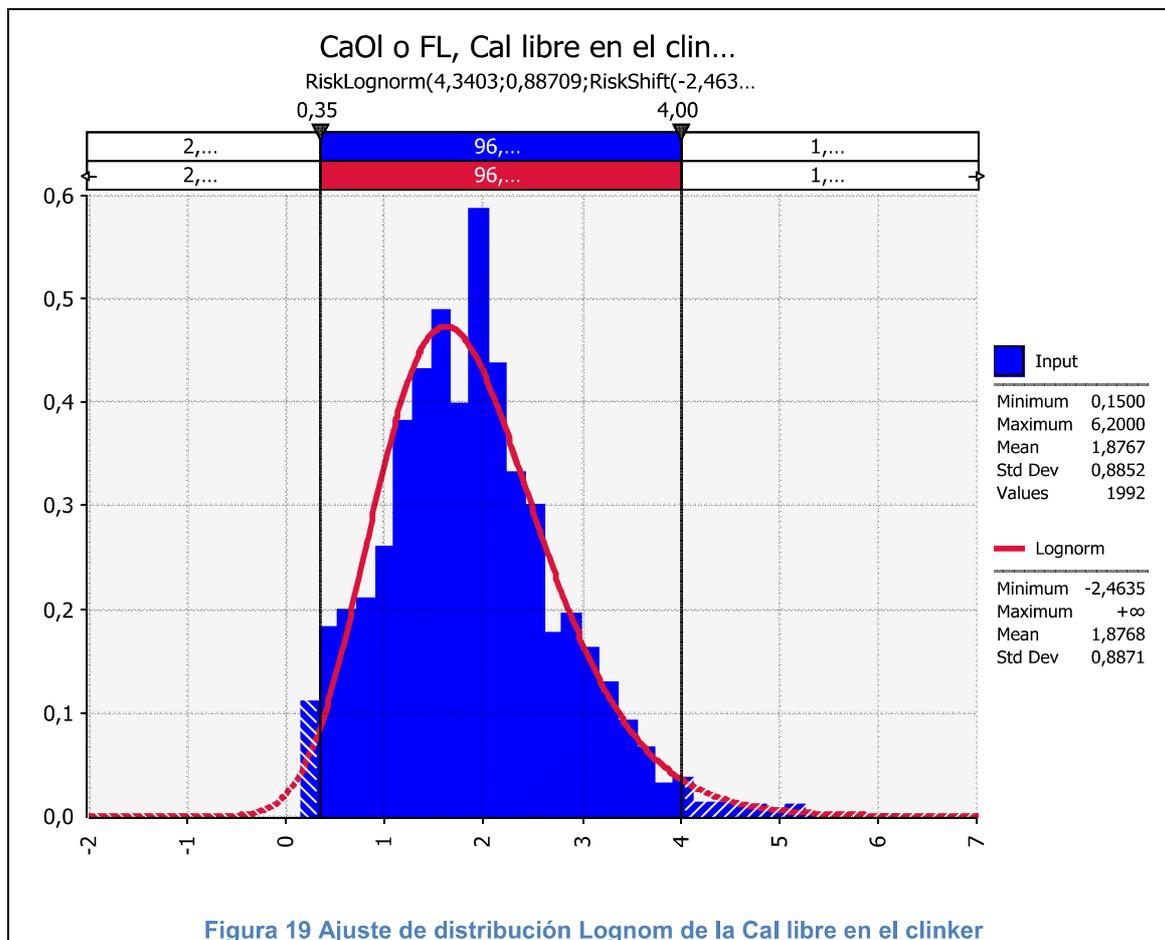
**Los parámetros de la distribución son:**

Tipo: Weibull; Media: 57,94 y Desviación estándar de 2,3235

“Esta Distribución fue establecida por el físico suizo Weibull quien demostró que el esfuerzo al que se someten los materiales puede modelarse de manera adecuada mediante el empleo de esta distribución. También se ha usado para modelar situaciones del tipo tiempo- falla, o bien puede indicar la vida útil de cierto artículo, planta o animal, confiabilidad de un componente” (Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2015)



### 3.2.5 Ajuste de Distribución CaOI; Cal libre en el clinker; CL



El Chi cuadrado resultante de este ajuste es de 314,95

**Los parámetros de la distribución son:**

Tipo: Lognormal; Media: 1,8768 y Desviación estándar de 0,8871

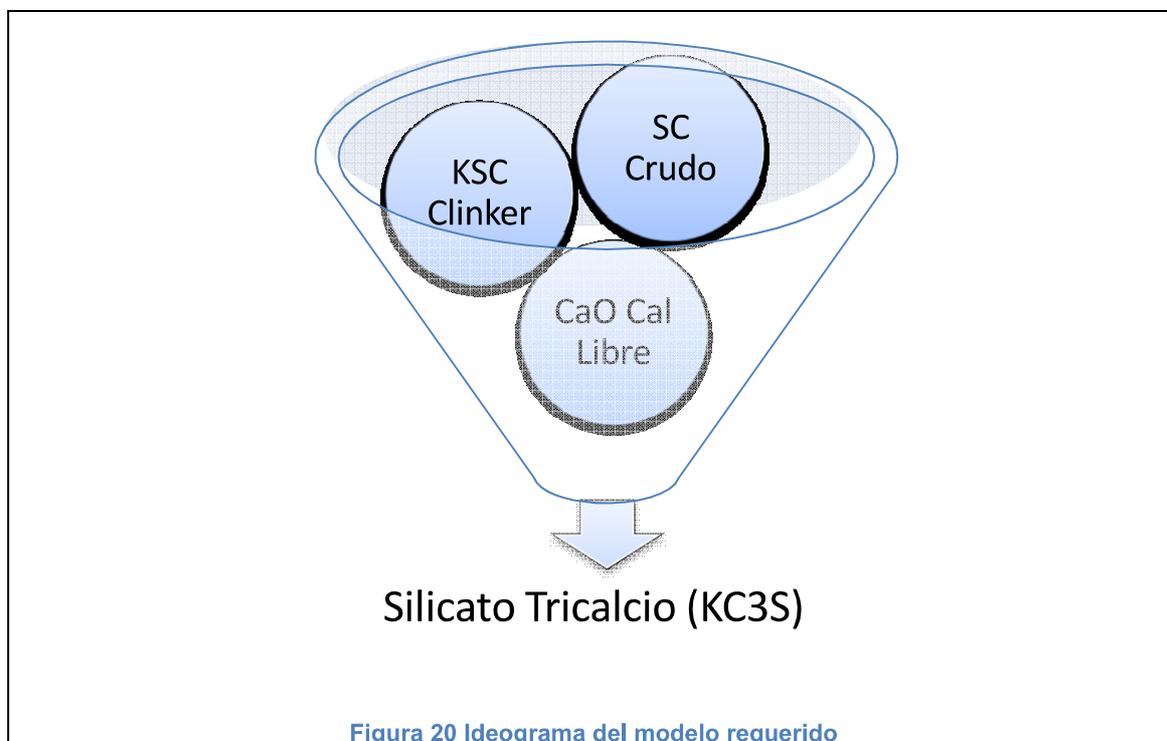
## CAPÍTULO 4.

### 4 Modelo estadístico de Funcionamiento del proceso de Calcinación

En el capítulo 2 se describen las proporcionalidades básicas producto de las ecuaciones que describen las relaciones químicas y que determinan los componentes mineralógicos del clinker. El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo que pueda representar el comportamiento del proceso; representando en forma de una ecuación simple; la transformación mineralógica de la harina en clinker.

La premisa básica es que este modelo sea de utilidad para poder concluir sensibilidades ante distintos tipos de variaciones de las variables de entrada; dado que se dispone de modelos de distribución de todas las variables que determinaremos como parte del Modelo.

#### 4.1 Determinación de variables de entrada



El esquema anterior describe básicamente las relaciones mostradas en el capítulo 2 y descritas en ecuaciones de proporcionalidad.

Con la saturación de Cal del clinker producido además de la Cal libre medida es fácil calcular el contenido de silicato tricálcio a través de las ecuaciones descritas en el capítulo, 2 sin embargo el modelo propuesto incorpora la saturación de cal de la harina cruda, para incluir la variabilidad de la saturación de cal del clinker respecto de la saturación de cal de entrada tal como se describe en la Figura 10 Desviación típica de Saturación de Cal en el clinker respecto de la saturación del Crudo Horno

#### **4.1.1 Variables explicativas relativas a la calidad del crudo**

Si el modelo usa como variables de entrada la saturación de cal del crudo, la cal libre y la saturación de cal del clinker, Es posible crear una regresión múltiple utilizando la base de datos disponible de entrada (crudo o Harina de Alimentación) y salida (Clinker producido a partir del crudo horno).

Idealmente la saturación de cal de la harina de alimentación debería ser igual a las Saturación del Cal del Clinker.

Sin embargo como se puede ver en las representaciones de distribución La saturación de entrada (crudo o Harina de Alimentación) SC; corresponde a una variación del tipo logística y la saturación de salida en el clinker (Clinker producido a partir del crudo horno). Corresponde a una distribución Gamma.

El modelo estadístico creado a partir de una regresión múltiple pretende explicar; mediante una ecuación simple, el comportamiento de esta transformación en el horno; esto es posible debido al uso de los datos disponibles de salida.

#### **4.1.2 Variables explicativas relativas al proceso.**

Al crear una correlación que use como variable de entrada la cal libre y reclame el C3S del clinker; se imprimirá en el modelo la capacidad estadística que tiene el proceso de transformar cierta Saturación de Cal de la Harina en C3S. El modelo utilizará el residuo no reaccionado. Es decir esta correlación mostrará el valor típico de C3S, para cierto Valor de Cal libre incluyendo la diferencia entre el crudo alimentado y el conseguido.

Estas correlaciones están fundamentadas en las ecuaciones ideales que describen las reacciones producidas en el proceso, pero al usar los datos estadísticos imprimirán el comportamiento de éste proceso específico en esta transformación, absorbiendo como parte del modelo todas las peculiaridades del proceso. Por esta razón el modelo descrito será válido únicamente para este horno en particular; sin embargo la metodología descrita puede ser utilizada para procesos similares.

Cabe anotar que durante los dos años de estudio de este proceso, este no ha sufrido cambios significativos en su estructura que pudieran afectar la consistencia de los datos.

#### **4.1.3 Regresión lineal múltiple como modelo predictivo**

Se plantea realizar una regresión lineal múltiple para establecer un modelo que permita pronosticar el valor de Silicato tricálcico KC3S en clinker, a partir del análisis de Cal libre la Saturación medida en la Harina cruda de alimentación y en el clinker esto.

A continuación se enuncian los requisitos teóricos para la aplicación de esta técnica (ROJO, 2015, pág. 4)

1. Debe tener sentido numérico.
2. No deberá de haber variables repetidas o redundantes
3. Las variables introducidas en el modelo deberán de tener una cierta justificación teórica.
4. La relación entre variables explicativas en el modelo y casos debe de ser como mínimo de 1 a 10.
5. La relación de las variables explicativas con la variable dependiente debe de ser lineal; es decir proporcional.

Las consideraciones de José Manuel Rojo conducen a la conclusión de que la variable dependiente (En nuestro caso el C3S del clinker; KC3S) ha sido generada por una combinación lineal de las variables explicativas:

- Saturación de Cal en el Crudo SC

- Saturación de cal en el clinker
- Cal libre Resultante del proceso de Clinkerización

Además la incorporación de un término aleatorio.

**Ecuación 17 Modelo de regresión lineal Múltiple (ROJO, 2015)**

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + u$$

**Ecuación 18 Modelo de Pronóstico de Saturación del Cal en el clinker.**

$$KC3S = b_1SC + b_2CL + b_3KCS + u$$

Los coeficientes  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  y  $u$ ; deben ser elegidos de forma que la suma de los distancias entre los valores observados y pronosticados sea mínima; lo que implica una minimización de la varianza residual

En el desarrollo del modelo se aplicará la herramienta de regresión Estadística del Software StatTools para encontrar la ecuación planteada, y una vez obtenido el modelo y el ajuste se realizará la validación del modelo a través de las herramientas estadísticas propuestas por José Manuel Rojo; en Su publicación de la Regresión Manual Múltiple. (ROJO, 2015, págs. 15-22); Todo esto con el fin de probar las siguientes hipótesis que validarán el modelo propuesto.

**Linealidad:** los valores de la variable dependiente están generados por un modelo lineal simple:

**Homocedasticidad:** todas las perturbaciones tienen la misma varianza.

**Independencia:** las perturbaciones aleatorias son independientes entre sí.

**Normalidad:** la distribución de la perturbación aleatoria (residuos) tiene distribución normal:

**Error de medida:** Las variables explicativas SC, CL y KSC se obtienen sin errores de medida

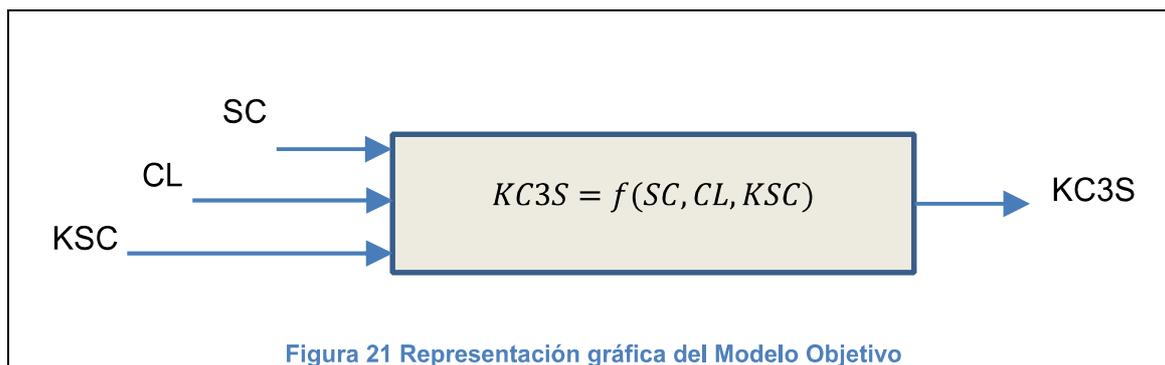


Tabla 15 Extracto de Salida de Herramienta de Regresión múltiple StatTools

<b>StatTools Report</b>						
<b>Analysis:</b> Regression						
<b>Performed</b>						
<b>By:</b> Diego Moreno						
<b>Date:</b> miércoles, 22 de abril de 2015						
<b>Updating:</b> Static						
<b>Summary</b>	<b>Multiple R</b>	<b>R-Square</b>	<b>Adjusted R-Square</b>	<b>StErr of Estimate</b>		
	0,9102	<b>0,8284</b>	0,8257	0,4494		
<b>ANOVA Table</b>	<b>Degrees of Freedom</b>	<b>Sum of Squares</b>	<b>Mean of Squares</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>p-Value</b>	
<b>Explained</b>	3	190,157	63,385	313,729	< 0.0001	
<b>Unexplained</b>	195	39,397	0,202			
<b>Regression Table</b>	<b>Coefficient</b>	<b>Standard Error</b>	<b>t-Value</b>	<b>p-Value</b>	<b>Confidence Interval 95%</b>	
					<b>Lower</b>	<b>Upper</b>
<b>Constant</b>	-138,372	6,827	-20,267	< 0.0001	-151,837	-124,907
<b>SC</b>	-0,0721	0,028	-2,491	<b>0,0136</b>	-0,129	-0,015
<b>C.L</b>	-3,972	0,157	-25,182	< 0.0001	-4,283	-3,661
<b>KSC</b>	2,1709	0,071	30,305	< 0.0001	2,029	2,312

#### 4.1.4 Interpretación de resultados

##### 4.1.4.1 p Value

El primer hallazgo es que el modelo es estadísticamente significativo con un valor de p value menor a 0,0001; de acuerdo a lo indicado por José Manuel Rojo, “En general si el p-value (nivel de significancia) es menor de 0,05 se acepta que el modelo de regresión es significativo; en caso contrario no podemos hablar de regresión, pues el modelo sería nulo” (ROJO, 2015, pág. 14)

Para el caso se puede observar que todas las variables explicativas aportan al modelo; todas ellas cumplen con su nivel de significancia menor a 0,05 indicando su aporte al modelo y también demostrando que no poseen multicolinealidad.

#### 4.1.4.2 Coeficiente de determinación $R^2$

El coeficiente de determinación  $R^2$  corresponde a la proporción entre la varianza explicada y la varianza total; por ser la suma de los cuadrados este valor es siempre positivo y en el caso de una regresión perfecta la varianza explicada será 0, por lo que el cociente será 1, la bondad del ajuste está determinada por este valor, mientras más cercano a 1, (Ajuste perfecto).

Para nuestro caso el  $R^2$  de la regresión, es de 0,8284; esto indica que la varianza de la variable dependiente KC3S es explicada el 75,22% de los casos por el modelo de regresión.

De acuerdo a Rojo se puede clasificar la calidad del ajuste en la siguiente escala.

**Tabla 16 Escala de bondad de ajuste de regresión**

Menor de 0.3	0.3 a 0.4	0.4 a 0.5	0.5 a 0.85	Mayor de 0.85
Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Sospechoso

Tomado de (ROJO, 2015, pág. 16)

Basados en la categorización anterior el ajuste desarrollado se encuentra en la categoría de “Bueno”.

Con estos dos indicadores de Bondad, p Value y  $R^2$  podemos determinar con facilidad el modelo buscado en forma de la ecuación descrita a Continuación.

**Ecuación 19 Modelo de Pronóstico de KC3S**

$$KC3S = -0,0721 SC - 3,9726 CL + 2,1709 KSC - 138,3722$$

#### 4.1.5 Validación del Modelo con técnicas estadísticas

##### 4.1.5.1 Multicolinealidad

La verificación de la multicolinealidad consiste en verificar los coeficientes de significancia en el modelo obtenido de la regresión.

Tabla 17 Niveles de significancia para las variables explicativas del modelo

Variable	p value	Criterio
Constante	<0,0001	<0,05
SC	0,0136	<0,05
CL	<0,0001	<0,05
KSC	<0,0001	<0,05

Basado en la evaluación absoluta del coeficiente de significancia se determina que no existe multicolinealidad en las variables

Es notable que la bondad del ajuste se mantenga con dos variables que no poseen correlaciones significativas; manteniendo el  $R^2$  en el valor de 0,8284

##### 4.1.5.2 Análisis de Residuos; Normalidad

Los residuos son la diferencia que existe entre el valor real del modelo de estudio y el valor calculado por el propio modelo, estos datos deben ser verificados en su distribución para conocer si siguen una función de distribución normal aceptable.

A continuación se muestra un extracto de la tabla de residuos obtenidas con la aplicación del modelo.

Tabla 18 Tabla de salida de aplicación del Modelo  $KC3S=f(SC, CL, KSC)$

Graph Data	KC3S	Fit	Residual	SC	C.L	KSC
1	59,08	58,24	0,84	97,33	1,97	97,40
2	57,93	57,29	0,64	97,96	1,87	96,79
3	57,29	56,97	0,31	97,80	1,26	95,54
4	56,42	55,91	0,51	98,92	1,81	96,08
5	56,60	56,61	-0,01	99,14	1,42	95,70
--	--	--	--	--	--	--
--	--	--	--	--	--	--
198	59,36	58,53	0,83	98,88	1,75	97,19
199	59,35	58,55	0,80	98,30	2,09	97,79

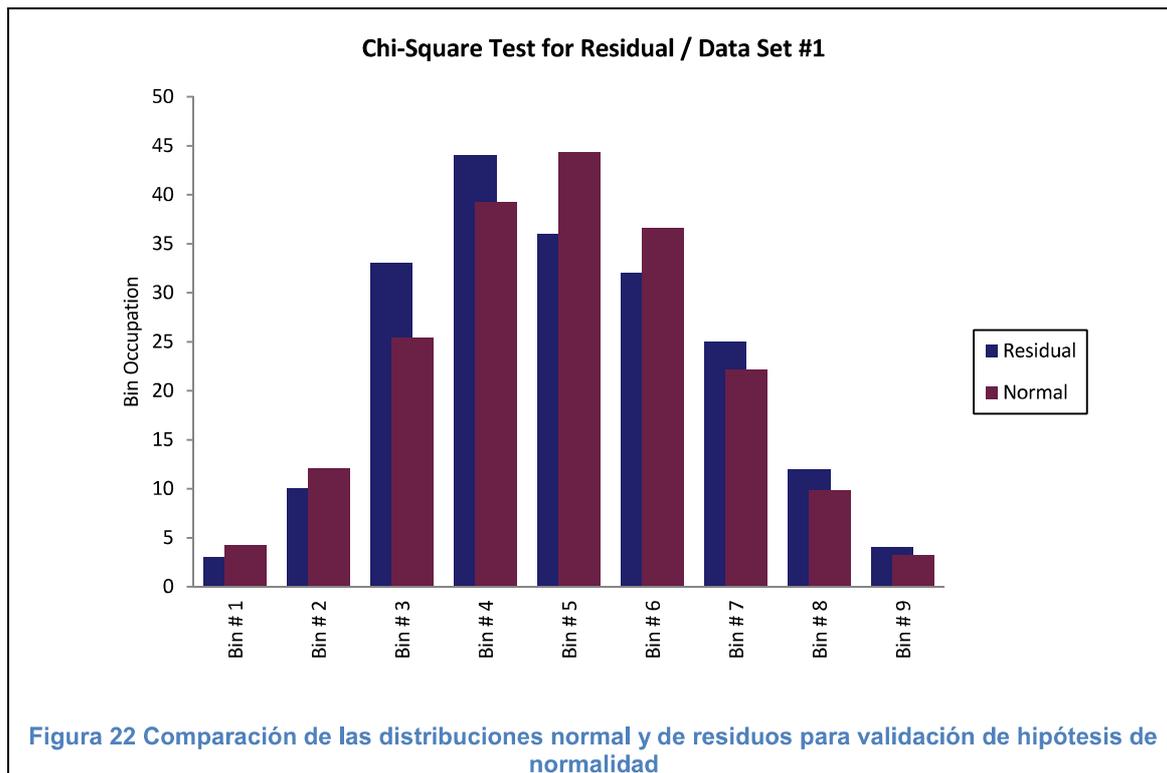
La columna identificada como fit, contiene el nuevo cálculo a través del uso del modelo y la columna identificada como Residual contiene los residuos de la operación, KSC-Fit.

Para determinar la distribución de los residuos se ejecutará la prueba de chi cuadrado de Normalidad.

Tabla 19 Prueba de Normalidad Chi cuadrado ejecutada a los residuos

<b>StatTools Report</b>					
<b>Analysis:</b> Chi-Squared Normality Test					
<b>Performed By:</b> Diego Moreno					
<b>Date:</b> miércoles, 22 de abril de 2015					
<b>Updating:</b> Live					
<b>Chi-Square Test</b>					
	<b>Residual</b>				
	<b>Data Set #1</b>				
Mean	0,0000				
Std Dev	0,4461				
Chi-Square Stat.	6,7508				
p-Value	<b>0,3445</b>				
<b>Chi-Squared Bins</b>					
	<b>Bin Min</b>	<b>Bin Max</b>	<b>Actual</b>	<b>Normal</b>	<b>Distance</b>
Bin # 1	-1,1092	-0,8566	3	4,1727	0,3296
Bin # 2	-0,8566	-0,6039	10	12,0376	0,3449
Bin # 3	-0,6039	-0,3512	33	25,4011	2,2733
Bin # 4	-0,3512	-0,0985	44	39,2131	0,5844
Bin # 5	-0,0985	0,1542	36	44,2922	1,5524
Bin # 6	0,1542	0,4068	32	36,6064	0,5797
Bin # 7	0,4068	0,6595	25	22,1359	0,3706
Bin # 8	0,6595	0,9122	12	9,7924	0,4977
Bin # 9	0,9122	1,1649	4	3,1684	0,2183

Al correr el ensayo de Normalidad se consigue un nivel de significancia de **0,3445** lo que verifica la normalidad de residuos; por lo tanto no se encuentran diferencias estadísticamente significativas para rechazar la hipótesis de distribución normal en los residuos.



#### 4.1.5.3 Homocedasticidad

De acuerdo a José Manuel Rojo “La hipótesis de homocedasticidad establece que la variabilidad de los residuos es independiente de las variables explicativas” (ROJO, 2015, pág. 22)

Una vez eliminadas la hipótesis de multicolinealidad y comprobada la distribución normal de los residuos se concluye la independencia de la variabilidad de los residuos respecto de las variables explicativas (Homocedasticidad)

Una vez realizadas las validaciones de la sección 4.1.5; se concluye la validez del modelo.

## **CAPÍTULO 5.**

### **5 Análisis de sensibilidad para cada caso presuntivo:**

Hasta el momento se ha definido el modelo estadístico del proceso de clinkerización a través de una regresión lineal múltiple; se ha validado la bondad del ajuste y además se ha verificado su validez estadística a partir de las pruebas estadísticas descritas en la sección 4.1.5 (Ver Validación del Modelo con técnicas estadísticas). Además se dispone de las distribuciones de las variables de entrada, por tanto es posible utilizar y modelar el proceso a través de la generación de números aleatorios que sigan las distribuciones encontradas para cada variable de entrada del modelo, por tanto la salida del mismo generará una salida aleatoria con una distribución propia.

La utilidad del modelo no está en pronosticar de manera puntual un solo valor pronóstico para las variables explicativas sino en pronosticar las variaciones en la variable de salida ante variaciones de entrada, es decir; el modelo expresado en términos de las distribuciones de variables explicativas generará una distribución de salida con características propias, siendo la más importante de ellas y por tanto objeto de este análisis la desviación estándar que se produce en la variable explicada.

#### **5.1 Modelo de Control o referencia de variaciones**

Para conocer el impacto y la sensibilidad de las variaciones de las variables de entrada hacia la variable explicada KC3S se definirá un modelo de referencia ajustado a las distribuciones encontradas en los datos originales; de esta manera encontraremos la desviación estándar original del proceso en condiciones estables. A partir de este modelo realizaremos inferencias en la variabilidad de las variables de entrada y recuperemos la variabilidad provocada en los datos de salida para verificar o determinar el impacto que producen sobre el modelo original.

En el capítulo 4 se desarrolla el modelo siguiente:

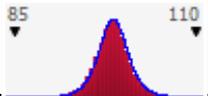
$$KC3S = -0,0721 SC - 3,9726 CL + 2,1709 KSC - 138,3722$$

**Ecuación 20 Modelo estadístico a utilizarse**

### 5.1.1 Distribuciones de variables explicativas

#### 5.1.1.1 SC

**Tabla 20 Distribución para variable explicativa SC**

Name	Graph	Function
Distribución ajustada de SC		RiskLogistic(98,6359;1,19;RiskName("Distribución ajustada de SC"))

Min	Mean	Max	Median	Std Dev	5%	95%	Errors
87,43	98,64	109,62	98,64	2,16	95,13	102,14	0

#### 5.1.1.2 CL

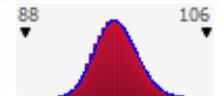
**Tabla 21 Distribución para variable explicativa CL**

Name	Graph	Function
Distribución ajustada de CL		RiskLognorm(4,3403;0,88709;RiskShift(-2,4635);RiskName("Distribución ajustada de CL"))

Min	Mean	Max	Median	Std Dev	5%	95%	Errors
-0,51	1,88	6,93	1,79	0,89	0,58	3,47	0

#### 5.1.1.3 KSC

**Tabla 22 Distribución para variable explicativa KSC**

Name	Graph	Function
KSC		RiskGamma(96,846;0,19654;RiskShift(78,11327);RiskName("KSC"))

Min	Mean	Max	Median	Std Dev	5%	95%	Errors
90,65	97,15	105,67	97,08	1,93	94,08	100,44	0

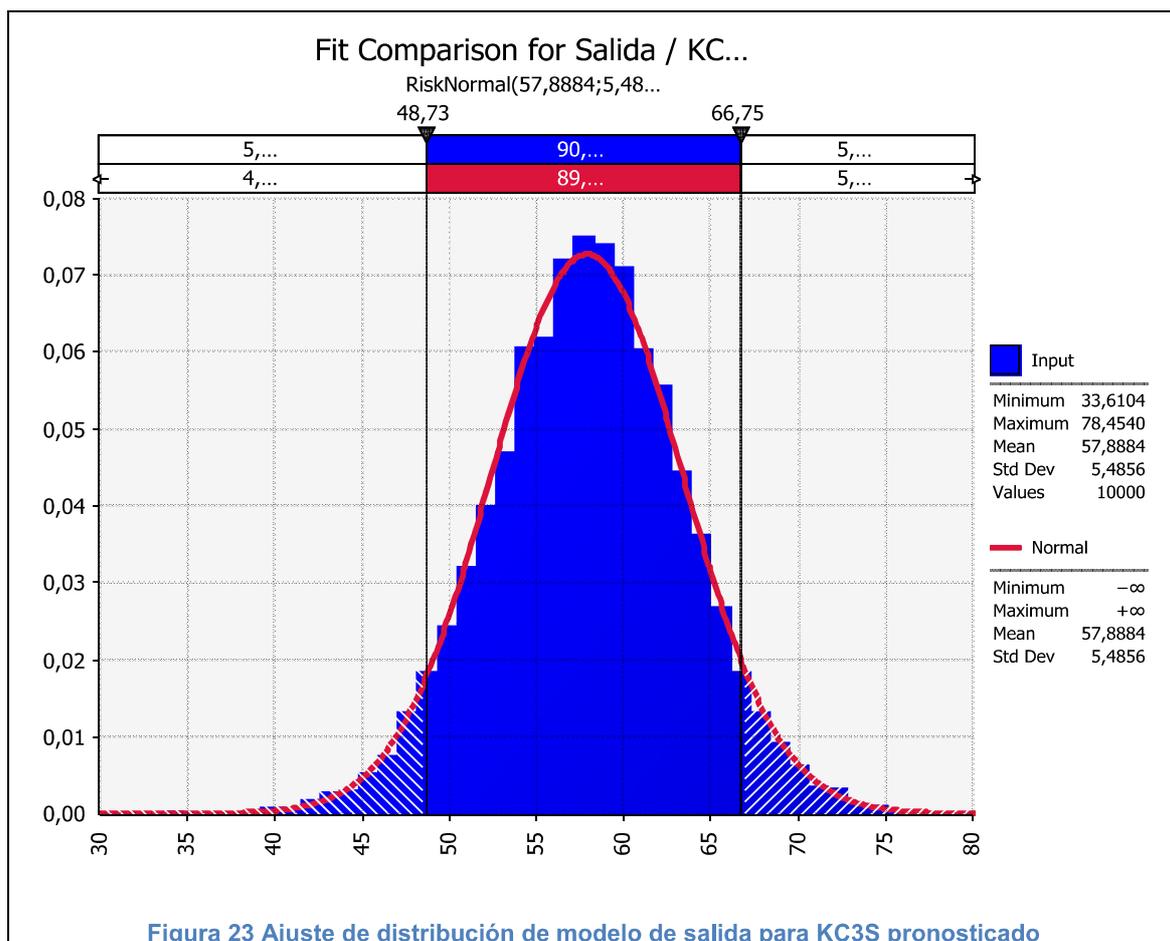
### 5.1.2 Distribuciones de KC3S, Salida del modelo

Tabla 23 Distribución para variable de salida KC3S

Name	Graph	Function
Salida / KC3S		RiskOutput("Salida / KC3S")

Min	Mean	Max	Median	Mode	Std Dev	5%	95%	Errors
33,61	57,89	78,45	57,98	59,38	5,49	48,73	66,75	0

El modelo de salida describe un modelo que se ajusta a una distribución normal con una media de 57.88 y una desviación estándar de 5,4856.



### 5.1.3 Síntesis Gráfica del modelo general

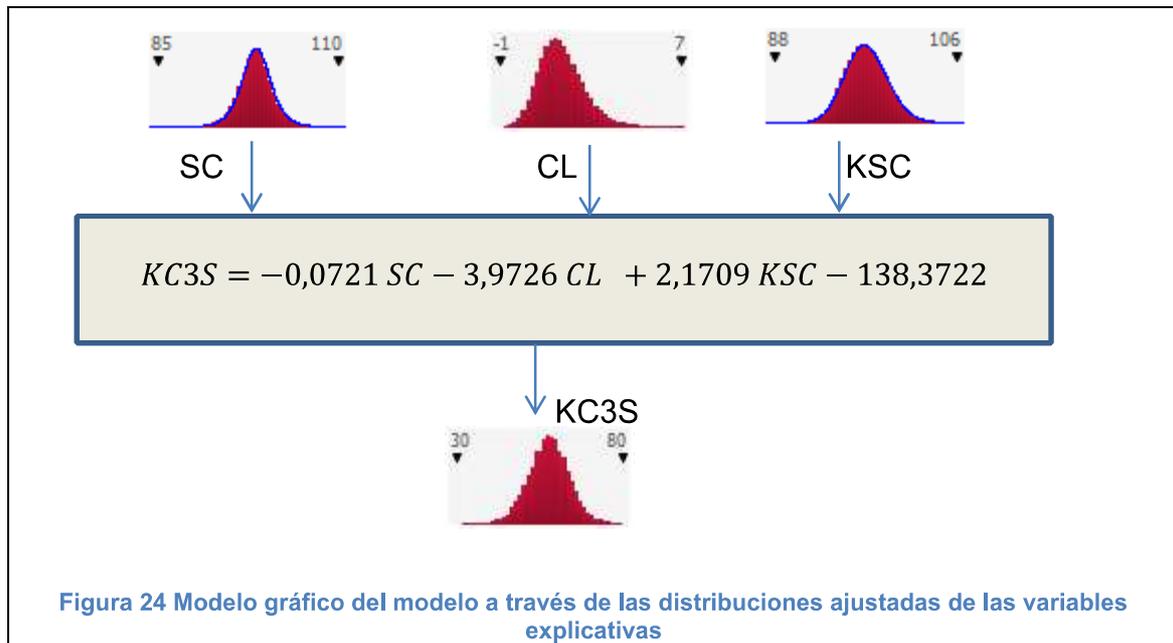


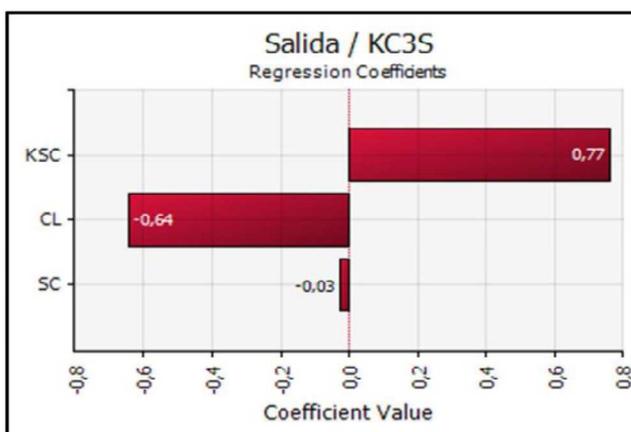
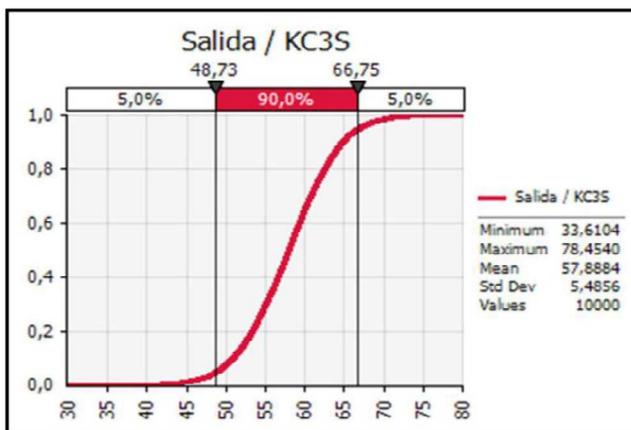
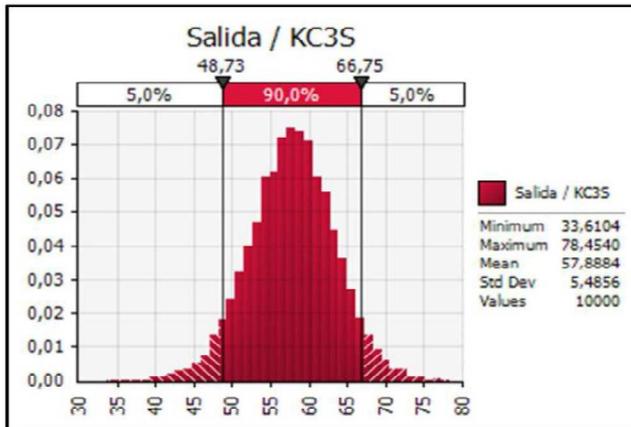
Figura 24 Modelo gráfico del modelo a través de las distribuciones ajustadas de las variables explicativas

Tabla 24 Análisis de la distribución de Salida del Modelo

**@RISK Output Report for Salida / KC3S**

Performed By: Diego Moreno

Date: jueves, 30 de abril de 2015 21:57:07

**Simulation Summary Information**

Workbook Name	Uso del modelo de pronostico.xlsx
Number of Simulations	1
Number of Iterations	10000
Number of Inputs	9
Number of Outputs	1
Sampling Type	Latin Hypercube
Simulation Start Time	4/30/15 21:32:38
Simulation Duration	00:00:02
Random # Generator	Mersenne Twister
Random Seed	1442160178

**Summary Statistics for Salida / KC3S**

Statistics		Percentile	
Minimum	33,61	5%	48,73
Maximum	78,45	10%	50,86
Mean	57,89	15%	52,24
Std Dev	5,49	20%	53,38
Variance	30,0921649	25%	54,25
Skewness	-0,077300886	30%	55,11
Kurtosis	3,155947213	35%	55,88
Median	57,98	40%	56,62
Mode	59,38	45%	57,30
Left X	48,73	50%	57,98
Left P	5%	55%	58,61
Right X	66,75	60%	59,32
Right P	95%	65%	60,01
Diff X	18,03	70%	60,77
Diff P	90%	75%	61,57
#Errors	0	80%	62,46
Filter Min	Off	85%	63,47
Filter Max	Off	90%	64,74
#Filtered	0	95%	66,75

**Regression and Rank Information for Salida / KC3S**

Rank	Name	Regr	Corr
1	KSC	0,765	0,753
2	CL	-0,642	-0,617
3	SC	-0,028	-0,029

**5.2 Falta de representatividad del muestreo en el proceso.**

Para verificar este impacto, simplemente incrementaremos las desviaciones de las variables de entrada debido a la suposición de que la falta de

representatividad de los muestreadores mostrará las desviaciones incrementadas de cada variable explicativa; en este caso el modelo deberá ejecutarse sobre variaciones conocidas de cada una de las variables; por tanto modelaremos las desviaciones incrementadas con respecto al modelo original, incrementando las desviaciones originales de las distribuciones manteniendo las desviaciones originales en cada caso verificando el impacto que causa en la desviación de Salida.

Por superposición, podremos concluir el impacto de las variaciones totales en escenarios en que se la variabilidad se vea incrementada en todas las variables

### 5.2.1 Variable explicativa SC

Se configuran tres casos incrementando la desviación estándar de la distribución que representa la variable explicativa SC; cada caso posee un incremento de una unidad en la desviación estándar, nótese que el caso 1 corresponde a la desviación estándar de la variable original incrementada en una unidad, el caso 2 en dos unidades y el caso 3 en 3 unidades; mientras que las demás variaciones se mantiene iguales a las del modelo original

**Tabla 25 Análisis de sensibilidad del modelo de salida vs incrementos de la Desv. estándar de SC**

SC	Modelo Original	Incremento Desv. Estándar SC		
Variable Explicativa	Desviación estándar	Caso 1	Caso 2	Caso 3
SC	2,16	3,16	4,17	5,18
KSC	1,93	1,93	1,93	1,93
CL	0,89	0,89	0,89	0,89
KC3S	5,46	5,45	5,49	5,49

### 5.2.2 Variable explicativa KSC

Se configuran tres casos incrementando la desviación estándar de la distribución que representa la variable explicativa KSC, Saturación de cal en clinker; cada caso posee un incremento de una unidad en la desviación estándar, nótese que el caso 1 corresponde a la desviación estándar de la variable original incrementada en una unidad, el caso 2 en dos unidades y el caso 3 en 3 unidades; mientras que las demás variaciones se mantiene iguales a las del modelo original.

Tabla 26 Análisis de sensibilidad del modelo de salida vs incremento de la Desv. estándar de KSC.

KSC	Modelo Original	Incremento Desv. Estándar KSC		
Variable Explicativa	Desviación estándar	Caso 1	Caso 2	Caso 3
SC	2,16	2,16	2,16	2,16
KSC	1,93	2,93	3,93	4,93
CL	0,89	0,89	0,89	0,89
KC3S	5,46	7,30	9,21	11,31

### 5.2.3 Variable explicativa CL

Se configuran dos casos incrementando la desviación estándar de la distribución que representa la variable explicativa CL; cada caso posee un incremento de 0,5 unidades en la desviación estándar, nótese que el caso 1 corresponde a la desviación estándar de la variable original incrementada en 0,5 unidades y el caso 2 en una unidad; mientras que las demás variaciones se mantiene iguales a las del modelo original.

Tabla 27 Análisis de sensibilidad del modelo de salida vs incremento de la Desv. Estándar de CL

CL	Modelo Original	Inc Desv. Estándar CL	
Variable Explicativa	Desviación estándar	Caso 1	Caso 2
SC	2,16	2,16	2,16
KSC	1,93	1,93	1,93
CL	0,89	1,39	1,89
KC3S	5,46	6,94	8,50

### 5.3 Calidad de Materias Primas.

Para calcular la incidencia de la variación de los óxidos requeriremos alterar el modelo en función de las alteraciones que provocan las materias primas; para realizar este análisis se propone inferir en la variación de cada óxido; es decir de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, todos estos son variables que afectan la variables de entrada SC, para cada caso se considerarán las demás constantes, es decir para la variación del CaO, mantendremos constantes los demás óxidos, de esta manera tendremos un resultado para cada variación individual.

Dado que modelo que poseemos, posee como entradas la saturación de cal de la harina os SC, necesitamos expresar estas variables en términos de los óxidos que componen la harina decarbonatada:

Para esto, se tomará las ecuaciones descritas en el capítulo 2 de Saturación de Cal en la Harina Cruda decarbonatada y de C3S potencial en la Harina Crudo

**Ecuación 21 Ecuación de Saturación de cal en el crudo**

$$LSF = SC = \frac{100 * C}{2.8 * S + 1.18 * A + 0.65 * F}$$

A partir una muestra representativa del crudo de Alimentación al Horno, se ejecutará el ajuste de distribución, para cada variable (óxido), y se determinará el impacto que posee en la Saturación del Cal (en términos de variabilidad o impacto sobre la desviación estándar de la variable SC); y a su vez estas variaciones serán la entrada para el modelo descrito en el capítulo 4 para poder determinar los impactos en la Saturación de Cal en el Clinker resultante

### 5.3.1 Crudo de Alimentación al Horno

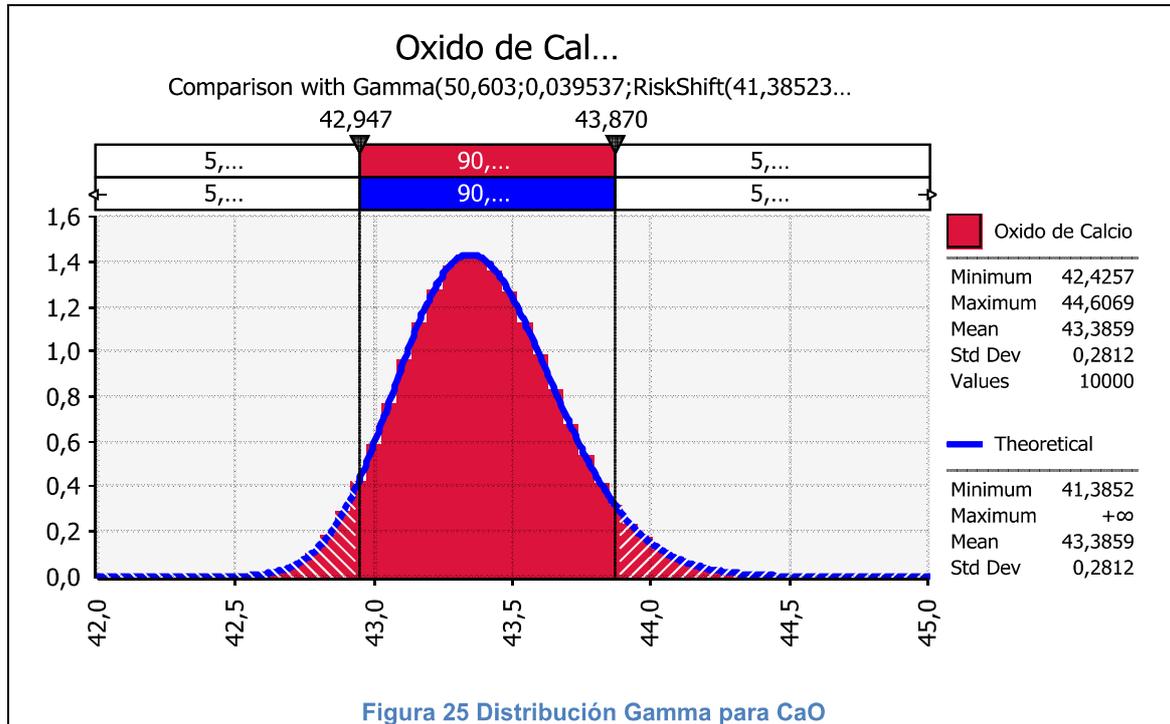
La caracterización de las variaciones de los óxidos principales se realizará a través del conjunto de datos representado en la tabla siguiente; correspondiente al mismo período de operación del horno

**Tabla 28 Datos de óxidos Harina de Alimentación al Horno, Crudo Horno**

Registro	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	Na2O	K2O	Ti2O	SUM
1	13,90	3,50	1,92	43,29	1,43	0,06	0,64	0,21	0,21	65,16
2	13,68	3,48	1,94	43,46	1,45	0,05	0,64	0,21	0,21	65,12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1.859	14,36	3,56	2,07	43,20	1,42	0,11	0,73	0,25	0,11	65,81
1.860	14,12	3,55	2,05	42,82	1,38	0,10	0,72	0,24	0,11	65,09

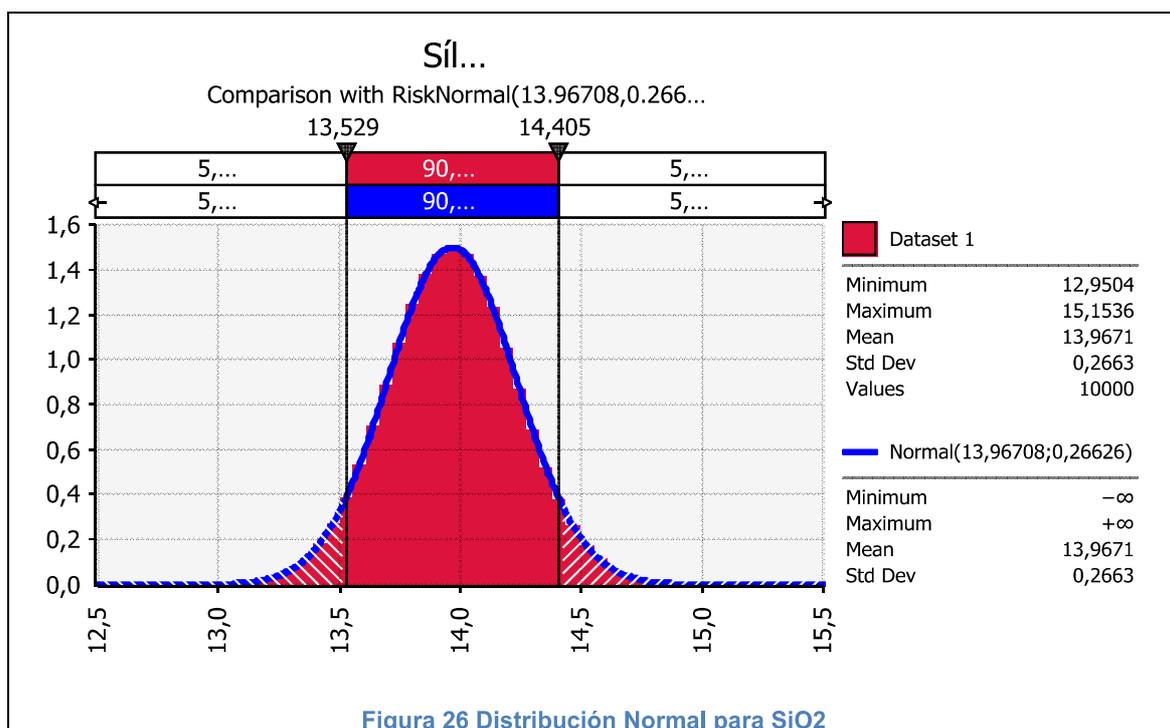
**Tomado del Control de Calidad Anual Reactor en estudio.**

### 5.3.2 Ajuste de Distribución de CaO Óxido de Calcio



El óxido de calcio se ajusta con una distribución Gamma, Una media 43,3 y una desviación estándar de 0,2812

### 5.3.3 Ajuste de Distribución de Dióxido de Sílice SiO<sub>2</sub>



El óxido de Sílice se ajusta con una distribución Normal, Una media 13,967 y una desviación estándar de 0,663

### 5.3.4 Ajuste de Distribución de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Alúmina

El Contenido de Alúmina se ajusta con una distribución Normal, Una media 3,45 y una desviación estándar de 0,1026

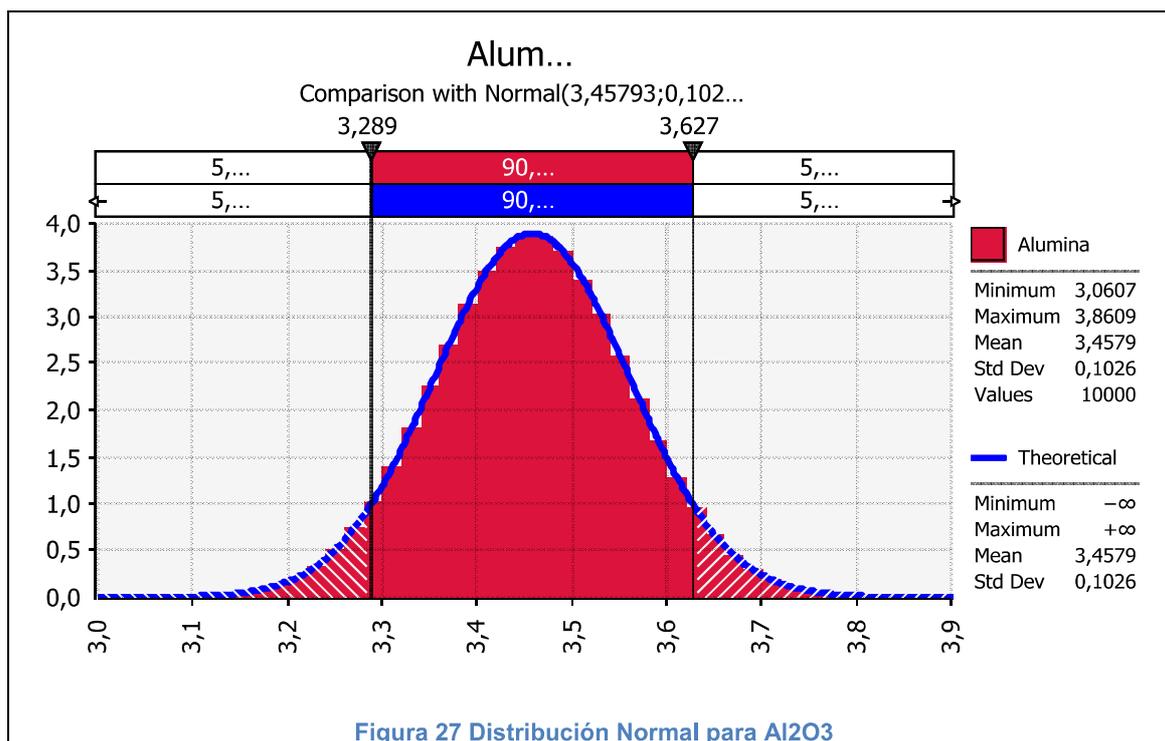


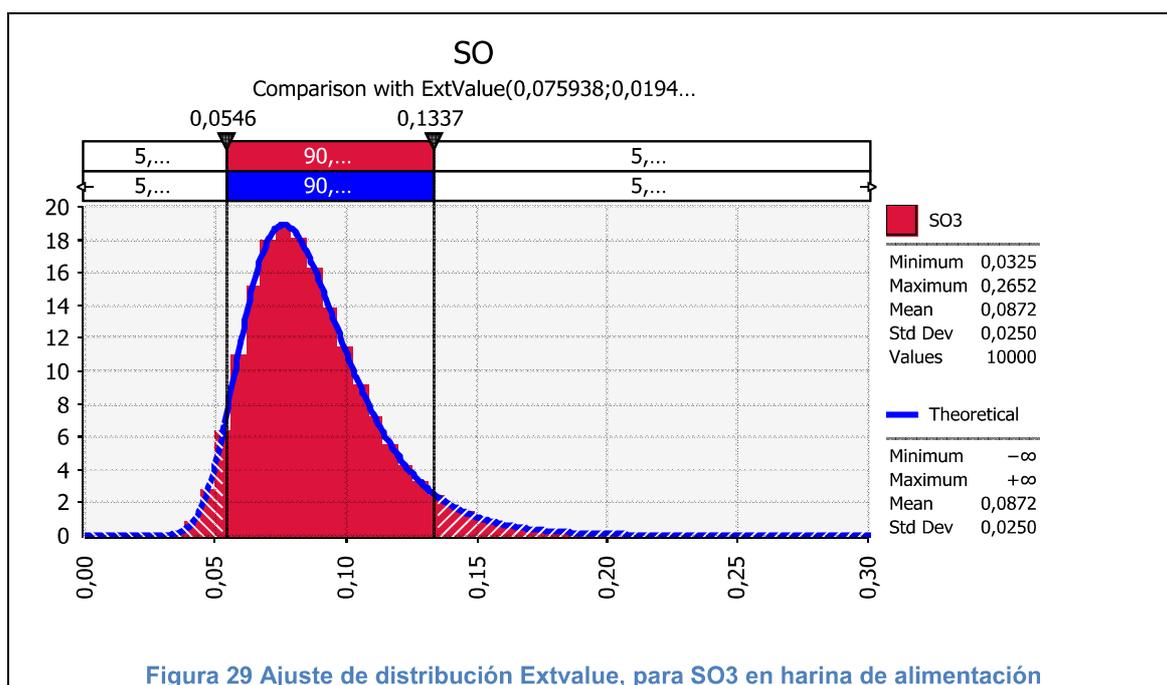
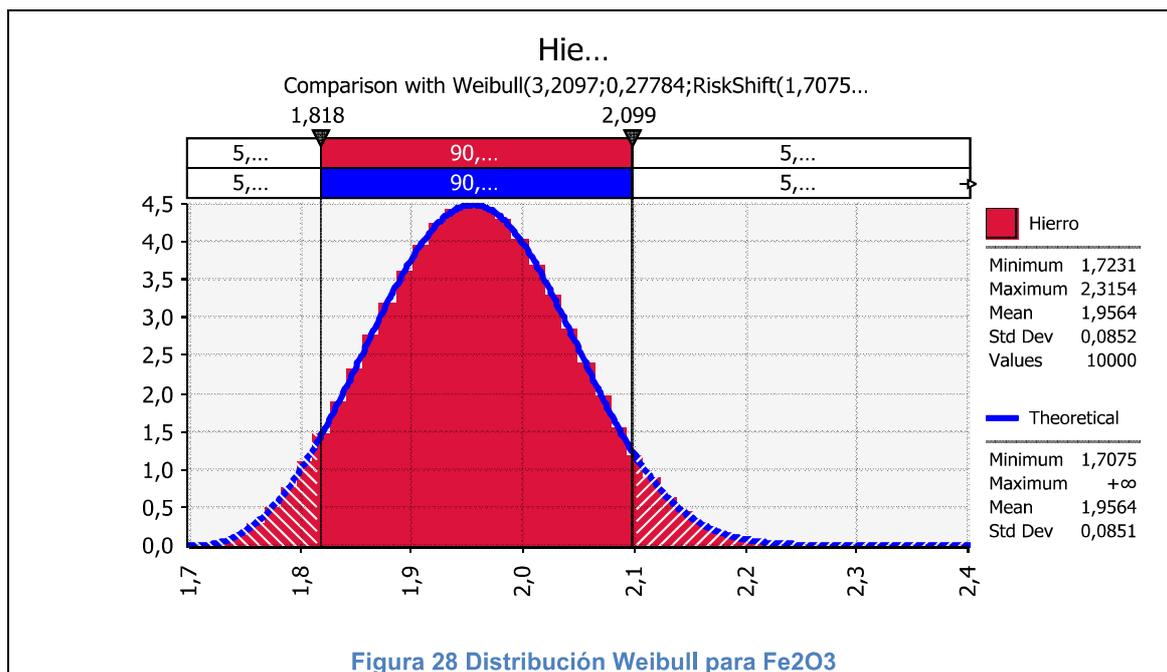
Figura 27 Distribución Normal para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### 5.3.5 Ajuste de Distribución de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Hierro

El óxido de Hierro se ajusta con una distribución Weibull, Una media 1,9564 y una desviación estándar de 0,0851. (Ver Figura 28 Distribución Weibull para Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

### 5.3.6 Ajuste de Distribución de SO<sub>3</sub> Azufre

El Contenido de SO<sub>3</sub> se ajusta con una distribución ExtValue, Una media de 0,08 y desviación estándar de 0,025 (Ver Figura 29 Ajuste de distribución Extvalue, para SO<sub>3</sub> en harina de alimentación)



### 5.3.7 Impacto de Variación de CaO

Una vez conseguidas las distribuciones de variación de todos los óxidos, se debe determinar el impacto en la variabilidad del SC; y dado que el SC constituye una de las variables explicativas de nuestro modelo es posible trasladar estas variaciones de SC a variaciones de nuestra variable

pronosticada KC3S, tal como se realizó en el capítulo anterior. Es decir; una vez ajustadas las distribuciones de los óxidos principales, verificaremos el impacto que poseen sobre la variable SC y luego sobre la variable explicada KC3S.

El Caso 1, corresponde a un incremento del doble de la desviación estándar del modelo original, En el caso 2 el multiplicador es 3 veces la desviación estándar y en el caso 3; será de 4 veces la desviación estándar. Estos casos han sido repetidos en las variaciones de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Nótese como la variación del óxido (CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>) Afecta la variable explicativa SC y ésta a través del modelo de regresión lineal puede trasladarse a variaciones de la variable objetivo KC3S, manteniendo las particularidades del reactor contenidas en la ecuación lineal que explica el modelo.

La variable explicativa KSC, también se verá afectada en cuanto a su variabilidad al inferir sobre las variaciones de las materias primas.

En un reactor de ensayo perfecto la variabilidad de la variable SC, debería ser igual a la de la variable KSC; sin embargo se aprecia un efecto homogeneizador en el reactor pues es evidente una disminución en la variabilidad de la harina al convertirse en clinker es decir el paso de SC a KSC.

Como se puede ver en el análisis de sensibilidad cuando la desviación estándar de la harina de alimentación es de 2,16 a la entrada del proceso, el proceso atenúa esta desviación al valor de 1,93.

Este efecto homogeneizador se puede expresar en función de la relación de ambas desviaciones estándar es decir corresponde a 0,9.

Tabla 29 Análisis de Sensibilidad para Incrementos de Variabilidad de CaO sobre la variable KC3S

Cao	Modelo Original	Incremento Desv. Estándar CaO		
		Variable Explicativa	Desviación estándar	Caso 1
CaO	0,281	0,563	0,844	1,125
SiO2	0,266	0,266	0,266	0,266
Al2O3	0,103	0,103	0,103	0,103
Fe2O3	0,085	0,085	0,085	0,085
SO3	0,025	0,025	0,025	0,025
SC	1,786	2,171	2,611	3,108
KSC	1,607	1,954	2,350	2,797
KC3S	4,954	5,518	6,212	7,060

### 5.3.8 Impacto de Variación de SiO2

Tabla 30 Análisis de Sensibilidad para Incrementos de Variabilidad de SiO2 sobre la variable KC3S

SiO2	Modelo Original	Incremento Desv. Estándar SiO2		
		Variable Explicativa	Desviación estándar	Caso 1
CaO	0,281	0,281	0,281	0,281
SiO2	0,266	0,533	0,799	1,065
Al2O3	0,103	0,103	0,103	0,103
Fe2O3	0,085	0,085	0,085	0,085
SO3	0,025	0,025	0,025	0,025
SC	1,786	3,344	5,008	6,700
KSC	1,607	3,010	4,507	6,030
KC3S	4,990	7,440	10,384	13,580

### 5.3.9 Impacto de Variación de Al2O3

Tabla 31 Análisis de Sensibilidad para Incrementos de Variabilidad de Al2O3 sobre la variable KC3S

Al2O3	Modelo Original	Inc. Desv... Estándar Al2O3	
		Variable Explicativa	Desviación estándar
CaO	0,281	0,281	0,281
SiO2	0,266	0,266	0,266
Al2O3	0,103	0,205	0,308
Fe2O3	0,085	0,085	0,085
SO3	0,025	0,025	0,025
SC	1,786	1,845	1,922
KSC	1,607	1,661	1,73
KC3S	4,920	5,054	5,200

#### 5.4 Incidencia de factor humano, Analista de turno.

La incidencia del factor humano en los análisis como fuente de datos del muestreo del que se dependen los modelos y los datos representados en este estudio están definidos por la repetibilidad de las mediciones.

Además la incertidumbre de la medición puede estar afectada también por la calibración del patrón de referencia usado y la resolución del instrumento de medición utilizado.

De acuerdo a (Metrycal, 2014); “La repetibilidad de las mediciones. <El número de veces que se repite el experimento afecta directamente en la incertidumbre del mensurando>”

La incertidumbre de las variables debido a la repetibilidad se puede expresar con la siguiente ecuación.

**Ecuación 22 Ecuación de incertidumbre por repetibilidad de los ensayos**

$$u = \frac{\text{Desviación estandar}}{\sqrt{\text{Número de Repeticiones}}}$$

**Tabla 32 Tabla de Incertidumbres en la medición**

Variable	U	Media	u/Media
SC	0,06	98,64	0,06%
KSC	0,13	98,38	0,19%
CL	0,03	1,88	1,37%

Tomado de (Metrycal, 2014)

La ecuación de incertidumbre  $u$ , utiliza la unidad de la variable explicativa, Cómo se puede notar los valores de incertidumbre por repetibilidad son bajos debido al muestreo extensivo realizado para este estudio (1200 registros).

Por ejemplo en el caso de SC, la incertidumbre asociada a la variable es de 0,06; lo que supone no significativa para los ensayos de sensibilidad; lo propio aplica para el resto de variables; se muestran además la incertidumbre expresada como relación a la media de los datos colectados.

## CAPÍTULO 6.

### 6 Síntesis de los datos de sensibilidad Obtenidos

En esta sección se sintetizan los resultados de las evaluaciones de escenarios de variabilidad en los que la desviación de entrada se ha incrementado a través la parametrización de la distribución a la que esta se ajusta; con el fin de facilitar el análisis y verificar el impacto en la variable de interés que provocan las variaciones de las variables explicativas,

#### 6.1 Variación de SC

Síntesis final para el caso de variación de Saturación de Cal en la harina de Alimentación y su impacto en la Variabilidad del C3S del Clinker

Tabla 33 Variación de  $\sigma_{SC}$  y su impacto en la  $\sigma_{KC3S}$

Caso Base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
$\sigma_{SC}=2.16$	$\sigma_{SC}+1$	$\sigma_{SC}+2$	$\sigma_{SC}+3$
$\sigma_{KC3S}=5.46$	$\sigma_{KC3S}$	$\sigma_{KC3S}+0.03$	$\sigma_{KC3S}+0.03$

#### 6.2 Variación en el KCS del clinker producido

Síntesis final para el caso de variación de KCS en el clinker y su impacto en la Variabilidad del C3S del Clinker.

Tabla 34 Variación de  $\sigma_{KCS}$  y su impacto en la  $\sigma_{KC3S}$

Caso Base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
$\sigma_{KSC}=1.93$	$\sigma_{KSC} +1$	$\sigma_{KSC} +2$	$\sigma_{KSC} +3$
$\sigma_{KC3S}=5,46$	$\sigma_{KC3S}+1.85$	$\sigma_{KC3S}+3.75$	$\sigma_{KC3S}+5.85$

### 6.3 Variación en la cal libre del clinker resultante

Síntesis final para el caso de variación de Cal libre en el clinker y su impacto en la Variabilidad del C3S del mismo

Tabla 35 Variación de  $\sigma_{CL}$  y su impacto en la  $\sigma_{KC3S}$

Caso Base	Escenario 1	Escenario 2
$\sigma_{CL}=0.89$	$\sigma_{CL}+0.5$	$\sigma_{CL}+1$
$\sigma_{KC3S}=1.64$	$\sigma_{KC3S}+1.48$	$\sigma_{KC3S}+3.04$

### 6.4 Variación del contenido de CaO

Síntesis final para el caso de variación del contenido de óxido de calcio (Cal) en la Harina de alimentación al Horno y su impacto en la Variabilidad del C3S del mismo

Tabla 36 Variación de  $\sigma_{CaO}$  y su impacto en la  $\sigma_{KC3S}$

Caso Base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
$\sigma_{CaO}=0.28$	$2 \sigma_{CaO}$	$3 \sigma_{CaO}$	$4 \sigma_{CaO}$
$\sigma_{KC3S}=4.95$	$\sigma_{KC3S}+0.56$	$\sigma_{KC3S}+1.26$	$\sigma_{KC3S}+2.11$

### 6.5 Variación del contenido de SiO<sub>2</sub>

Síntesis final para el caso de variación del contenido de SiO<sub>2</sub> en la Harina de alimentación al Horno y su impacto en la Variabilidad del C3S del mismo

Tabla 37 Variación de  $\sigma_{SiO2}$  y su impacto en la  $\sigma_{KC3S}$

Caso Base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
$\sigma_{SiO2}=0.266$	$2 \sigma_{SiO2}$	$3 \sigma_{SiO2}$	$4 \sigma_{SiO2}$
$\sigma_{KC3S}=1.615$	$\sigma_{KC3S}+2.46$	$\sigma_{KC3S}+5.40$	$\sigma_{KC3S}+8.59$

## 6.6 Variación del contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Síntesis final para el caso de variación del contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alúminas) en la Harina de alimentación al Horno y su impacto en la Variabilidad del C3S del mismo

Tabla 38 Variación de  $\sigma_{Al_2O_3}$  y su impacto en la  $\sigma_{KC3S}$

Caso Base	Escenario 1	Escenario 2
$\sigma_{Al_2O_3}=0.103$	$2 \sigma_{Al_2O_3}$	$3 \sigma_{Al_2O_3}$
$\sigma_{KC3S}=1.615$	$\sigma_{KC3S}+0.14$	$\sigma_{KC3S}+0.29$

## **CAPÍTULO 7.**

### **7 Conclusiones y Recomendaciones**

#### **7.1 Conclusiones**

##### **7.1.1 Eficiencia**

Una industria de proceso continuo busca optimizar su proceso de producción a través de la optimización del mismo, uso eficiente de recursos y una gestión adecuada de incidentes. El impacto que este proceso tiene en los resultados es notablemente significativo como parte de la cadena de valor. A pesar de que la cadena de valor de las organizaciones empieza en el requerimiento del cliente y termina en la satisfacción del mismo; el cliente como tal no es consciente de la eficiencia que la cadena de valor que generó ese producto. Sin embargo el cliente realiza una selección al preferir el más competitivo o el que más se ajuste a sus definiciones de Calidad.

##### **7.1.2 Liderazgo de costos como herramienta de competitividad**

El gestionar la cadena de valor de forma eficiente en una industria masiva de producción de bienes genéricos como el cemento; implica inevitablemente adoptar una estrategia de competitividad basada en liderazgo por costos. Para lograrlo; la estabilidad del proceso de producción es una condición básica para la regularización de la producción, los costos involucrados y la regularidad del producto.

##### **7.1.3 Eficiencia de costos = Estabilidad de Proceso continuo**

Esta estabilidad es requerida a lo largo de todo el proceso de fabricación de cemento; para lograrlo se requiere:

##### **7.1.4 Estabilidad Saturación de cal= Estabilidad de C3S.**

El estudiar la variabilidad de la saturación de cal en el clinker y verificar la sensibilidad de este indicador de calidad respecto de las características de la harina de alimentación; es útil únicamente si se proyecta hacia el C3S

incluyendo dentro de las variables explicativas la cal libre. Esto le otorga sentido práctico al modelo y además incluirá en la regresión las particularidades del proceso.

#### **7.1.4.1 Estabilidad química y características de sus fuentes de materias primas.**

La pureza y uniformidad de sus canteras determinan naturalmente cierto nivel de ventaja respecto a otro actor con una variabilidad mayor.

El tipo de formación mineral y las características del mismo determinan el nivel de aditivos o correctivos requeridos para la fabricación de Cemento Portland, existen casos de plantas con dos materias primas para la formación del Crudo, mientras que la regla general suele ser al menos cuatro aportantes para conseguir los objetivos de calidad mínimos requeridos. Características como la dureza y la quemabilidad del crudo son factores críticos de diseño que determinan el nivel óptimo de consumo de energía requerida para la transformación en el proceso de fabricación.

A pesar de la abundancia de caliza en la corteza terrestre; la selección adecuada de la misma para fines cementeros debe ser estudiada a detalle para garantizar pureza, uniformidad y disponibilidad con el fin de garantizar la sostenibilidad del negocio de producción de cemento.

#### **7.1.4.2 Gestión de canteras**

Independientemente del tipo de material disponible la gestión de las variaciones naturales en los estratos que conforman las canteras es una herramienta de consecución de la uniformidad requerida. En el capítulo 6 se puede evidenciar las correlaciones entre las variaciones de los óxidos principales y el impacto en la variabilidad del C3S del clinker.

#### **7.1.4.3 Uniformidad de la operación**

Tanto los procesos identificados; como gestión de canteras, pre homogenización, Molienda de crudo, Clinkerización y Molienda de cemento;

Constituyen una fuente de perturbaciones ya que eventos como paros inesperados, calidad de combustibles e inclusive el estilo de operación del proceso impactan en los resultados del reactor. Por esta razón el modelo realizado en la presente investigación es válido únicamente para el reactor observado mientras las condiciones del proceso no cambien. Dado que el modelo se basa en una regresión lineal múltiple a partir de los datos históricos de calidad, los pronósticos de estos modelos son válidos únicamente mientras el proceso físico se mantenga en las mismas condiciones.

#### **7.1.4.4 Control estadístico y muestreo del proceso**

El muestreo intensivo al que este proceso es sometido con el fin de obtener regularidad por sí mismo puede implicar un ruido adicional en el caso de que no se gestione de manera adecuada. En el caso de estudio todos los datos son obtenidos a partir del mismo equipo analítico de datos, se ha verificado la repetibilidad de análisis y homogeneidad en la preparación de las muestras llevadas a cabo por los analistas para minimizar el ruido agregado al modelo. Sin embargo el eliminar del todo estas variaciones es imposible, por lo que el modelo intrínsecamente tendrá el componente de esta afectación. Esto debido a que los datos de entrada/salida usados para la construcción del modelo también lo poseen. Esto es verificable al revisar la correspondencia entre los pronósticos del modelo y los datos reales a través del indicador de bondad de ajuste  $R^2$ .

#### **7.1.5 Validación del modelo obtenido**

Los datos históricos de las variables utilizadas para el modelo, se han definido como variables explicativas y la variable dependiente corresponde al resultado de la interacción de las mismas. La regresión lineal múltiple provee un ajuste aceptable de los datos  $R^2=0.824$  asumiendo las variaciones y particularidades que los datos de entrada históricos contienen.

Debemos considerar además de la bondad del ajuste las condiciones estadísticas de Multicolinealidad, Homocedasticidad, Independencia y errores de medida fijos. Durante el proceso de regresión se ha verificado que no existe

multicolinealidad entre las variables explicativas a través del nivel de significación en la regresión de cada variable. La prueba de normalidad de los residuos ha validado completamente el modelo utilizado, consiguiendo un nivel de significancia de 0,3445 lo que verifica la normalidad de residuos; por lo tanto no se encuentran diferencias estadísticamente significativas para rechazar la hipótesis de distribución normal en los residuos.

#### **7.1.6 Superposición de sensibilidades**

Las características de variabilidad de los datos históricos han sido modeladas a través de un ajuste de distribución estadístico; lo que no sólo permite medir la variabilidad de los datos sino también inferir en la misma para someter al modelo a variables con ciertas características de variabilidad. En los análisis de sensibilidad estas variaciones han sido modeladas individualmente a una misma base por lo que para un pronóstico de variabilidad de más de una de las variables explicativas o de los óxidos principales se puede utilizar el método de superposición para encontrar el efecto combinado de ambas variaciones.

#### **7.1.7 Entregable resultado del estudio**

Los procesos de toma de datos, depuración y selección de datos así como la determinación de la bondad de los ajustes tanto en las variables explicativas como en la regresión múltiple constituyen los elementos claves que validan los resultados de sensibilidad resumidos en el capítulo 6. El análisis de sensibilidad y la superposición de los mismos constituyen el entregable de este estudio, pues esta información se convierte en insumo para actuar o no, sobre las variables que impactan la variabilidad de la saturación de clinker.

La determinación del modelo es un proceso repetible a partir de los datos históricos de cualquier proceso de calcinación de clinker; por tanto se considera que la herramienta es aplicable a cualquier proceso de producción de clinker que cuente con datos históricos suficientes para construir las distribuciones y el modelo estadístico.

## **7.2 Recomendaciones**

### **7.2.1 Acciones sobre las variables explicativas**

Los resultados de la corrida del modelo indican la sensibilidad de la variabilidad del C3S del clinker expresada en términos de su desviación estándar y por orden de significancia:

1. Variabilidad del contenido de Sílice en materias primas.
2. Variabilidad de la Saturación del Cal en el clinker o harina Cruda.
3. Variabilidad de la cal libre que el proceso puede imprimir en el clinker

Por tanto las acciones para garantizar uniformidad del clinker deben ir encaminadas en ese orden de ponderación.

### **7.2.2 Control del Contenido de SiO<sub>2</sub> en la harina de alimentación al horno**

El módulo de sílice es proporcional al contenido de SiO<sub>2</sub> en la harina cruda y en el clinker, por lo tanto se propone mantener la banda de control existente de Módulo de sílice; pero además incluir una banda de variabilidad del SiO<sub>2</sub>, en la harina cruda el objetivo a mantener debe ser una desviación estándar < 0,18; con el fin de obtener una variación aceptable <1 en el C3S del clinker.

### **7.2.3 Actuar desde la fuente en el control de SiO<sub>2</sub>**

Debido a que se trata de uno de los materiales correctivos en la formación del crudo será necesario actuar desde el nivel de obtención de esta materia prima en cantera, en su entrada al proceso (báscula de dosificación; Precisión y exactitud) y en las acciones para mantener estabilidad en el proceso.

- Redefinir la operación minera para garantizar mayor estabilidad en la fuente.
- Incrementar la frecuencia de calibración de los dosificadores de Sílice en el proceso de molienda cruda para garantizar disminución de errores relativos a la medición.

- Realizar un contraste de dosificadores con una frecuencia mensual para validar la calibración realizada (Proceso cruzado inter-funcional; Instrumentación – Control de Calidad).
- Típicamente en el silo de homogenización se verifica la relación entre las desviaciones estándar de entrada y salida de parámetros como la Saturación de cal y el C3 S potencial, por lo tanto se plantea realizar el seguimiento adicional de la relación de homogenización del Módulo de Sílice para el caso de la Harina de alimentación al Horno y sobre el contenido de sílice en el caso de los pre-homogeneizadores de materia prima.

#### **7.2.4 Nuevo objetivo de Variabilidad de Cal libre**

Objetivo de variabilidad de Cal libre,  $< 0.5$ ; esto disminuirá la desviación del C3S del clinker, estadísticamente es fácil de determinar esta mejora, sin embargo en el sentido práctico se requerirán acciones para estabilizar la quema del horno.

#### **7.2.5 Acciones control sobre el proceso de calcinación**

Acciones de control, más suaves sobre el horno en base al modelo predictivo, esto permitirá disminuir la banda de variación y por tanto el resultado deberá presentar menor variabilidad con una desviación estándar de la cal libre de 0.5; se espera una desviación estándar en el C3S del clinker menor a 1.

- Definir acciones más suaves y uniformes respecto al consumo térmico del horno (Tabla de conducción del horno)
- Mantener, Matriz fija de combustibles, evitar cambios bruscos en los remplazos y entrada de combustibles al proceso.

#### **7.2.6 Efecto discreto de las variaciones de Alúmina en el Crudo de Alimentación.**

Si bien la alúmina no constituye una fuente de variabilidad de la saturación de la cal en el clinker, su característica fundente juega un papel muy importante en el proceso al regular la fase líquida y por tanto de la energía que se entrega al

horno para la reacción; el descontrol de la misma impactará en la variabilidad de la cal libre, la misma que por sí mismo tiene mayor influencia en el C3S del clinker; tal como lo describe el modelo de la sección 3 de este estudio.

### **7.2.7 Mejora continua en la variabilidad de las variables explicativas**

En conclusión las acciones de control del proceso deben orientarse a mantener estable la cal libre y las acciones de control de calidad deben cuidar primero la variación del SiO<sub>2</sub>, provenientes de la arcilla y del óxido de sílice; manteniendo los indicadores clásicos del crudo.

El análisis de variabilidad de los datos históricos de los componentes principales en los óxidos constituye una información de línea base para evaluar la efectividad de las medidas propuestas. Por lo que se proponen los siguientes objetivos de control para el año en curso:

- Desviación estándar del contenido de SiO<sub>2</sub> en la harina Cruda < 0.15.
- Desviación estándar de la saturación de cal en el crudo de alimentación <1; como herramienta para mantener uniforme la saturación de cal en el clinker.
- Desviación estándar cal libre < 0.5
- Establecer consigna de operación en función de la variabilidad de las variables de operación, (ej. temperatura de la zona de clinkerización).

## 8 REFERENCIAS

- BATTHY, Javed I. (2004). Innovations in Portland Cement Manufacturing. Portland Cement Association.
- BLANCO, Á. F. (s.f.). LECCION 20 .- CEMENTOS / HORNO ROTATORIO. TIPOS. En A. F. Blanco.
- Campodocs. (23 de Enero de 2015). [www.campodocs.com](http://www.campodocs.com). Obtenido de [http://campodocs.com/articulos-noticias-consejos/article\\_144442.html](http://campodocs.com/articulos-noticias-consejos/article_144442.html)
- DUDA, W. H. (1977). Manual Tecnológico del Cemento. Sevilla: Editores Técnicos Asociados S.A.
- FICEM Activity Report. (2013). Informe estadístico Regional 2013.
- FLSmith Institute. (2002). Proceso y Operación de los Sistemas de hornos Asocem . En Mezclas de Materias Primas y Sus características (pág. 5).
- INECYC Instituto Ecuatoriano del Cemento y el concreto. (2014). COMERCIALIZACIÓN DE CEMENTO GRIS DE LA INDUSTRIA.
- INEN. (2011). Norma Técnica Ecuatoriana 490. Quito .
- LABAHN Otto, K. B. (1985). Prontuario del Cemento. En K. B. LABAHN Otto, Prontuario del Cemento. Barcelona: Reverte.
- Metrycal. (25 de 01 de 2014). <http://www.metrycal.com>. Obtenido de [metrycal.com](http://www.metrycal.com): /Estimacion\_de\_la\_incertidumbre\_de\_medida
- PORTER, M. (1997). La Ventaja Competitiva. Díaz de Santos.
- ROJO, J. M. (24 de Enero de 2015). [www.uned.es](http://www.uned.es). Obtenido de Universidad Nacional de Educación a Distancia Madrid España: [http://portal.uned.es/pls/portal/docs/PAGE/UNED\\_MAIN/LAUNIVERSIDAD/VICERRECTORADOS/INVESTIGACION/O.T.R.I/OFERTAS%20TECNOLOGICAS/DMAC/DOCUMENTOS%20Y%20TUTORIALES/REGRESION\\_LINEAL\\_MULTIPLE\\_3.PDF](http://portal.uned.es/pls/portal/docs/PAGE/UNED_MAIN/LAUNIVERSIDAD/VICERRECTORADOS/INVESTIGACION/O.T.R.I/OFERTAS%20TECNOLOGICAS/DMAC/DOCUMENTOS%20Y%20TUTORIALES/REGRESION_LINEAL_MULTIPLE_3.PDF)

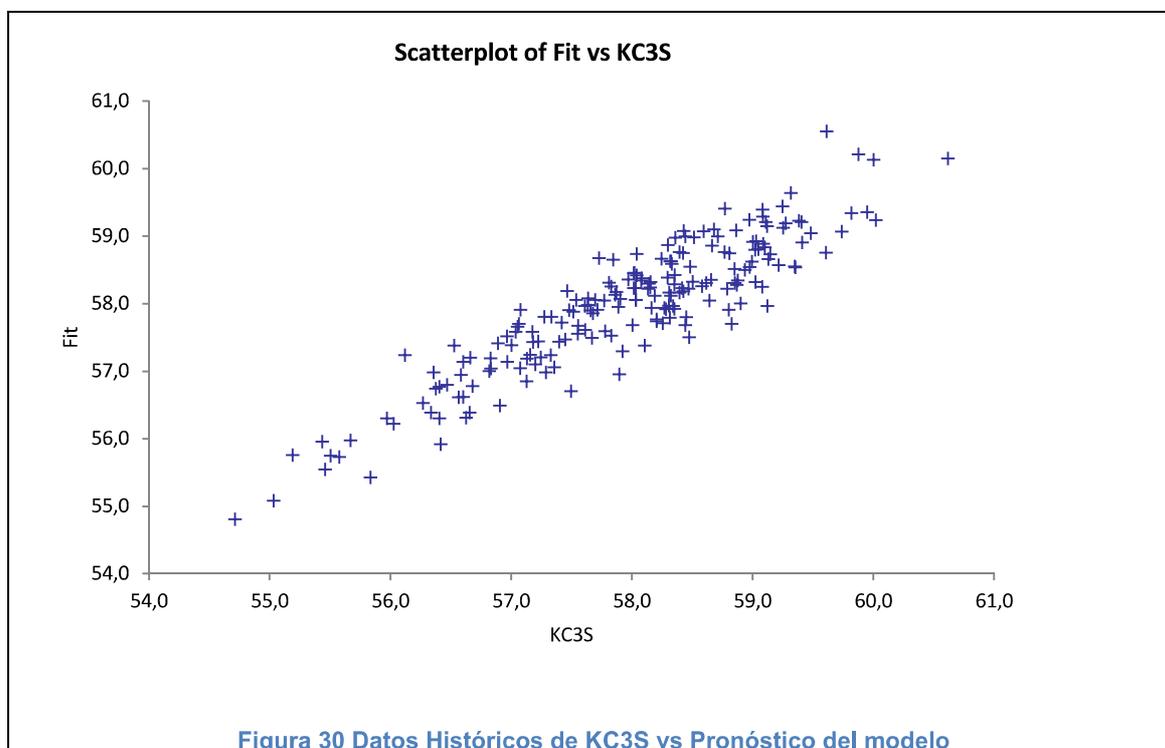
Universidad de Oviedo. (22 de Enero de 2015). Obtenido de Universidad de Oviedo Escuela Ingeniería de Minas Energía y Materiales: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion11.CEMENTOS.Modulos.FormulasCal.AptitudCOCCION.ppt.pdf>

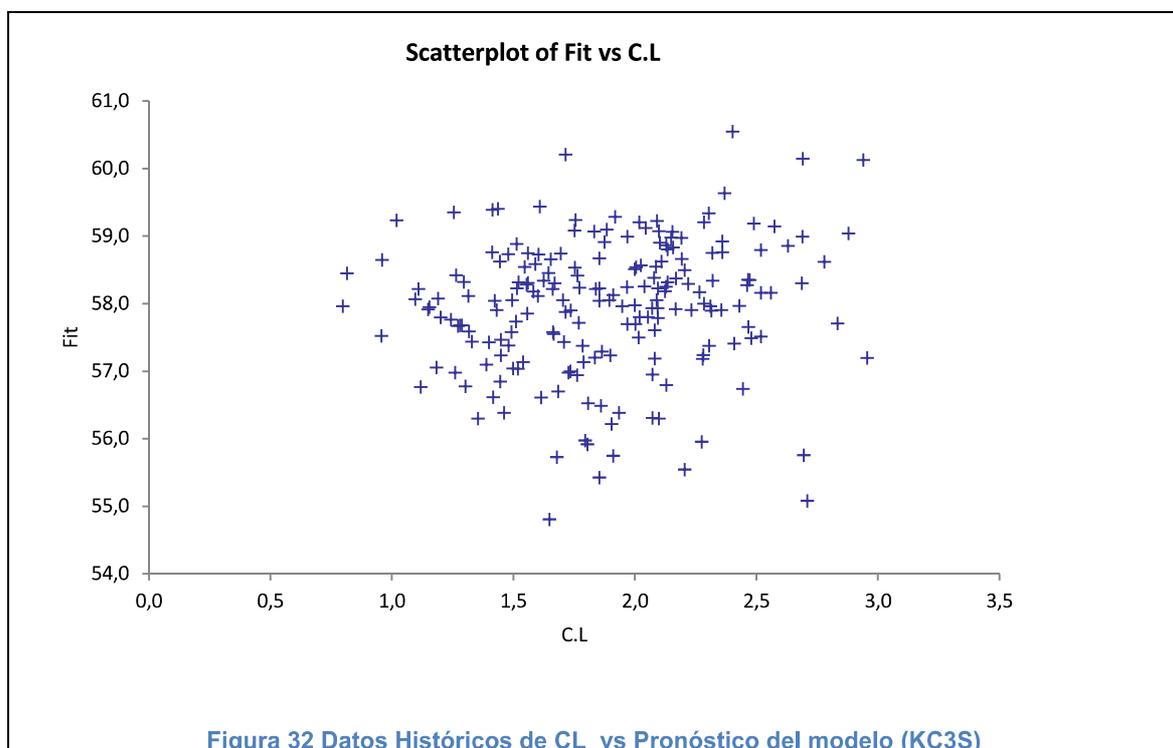
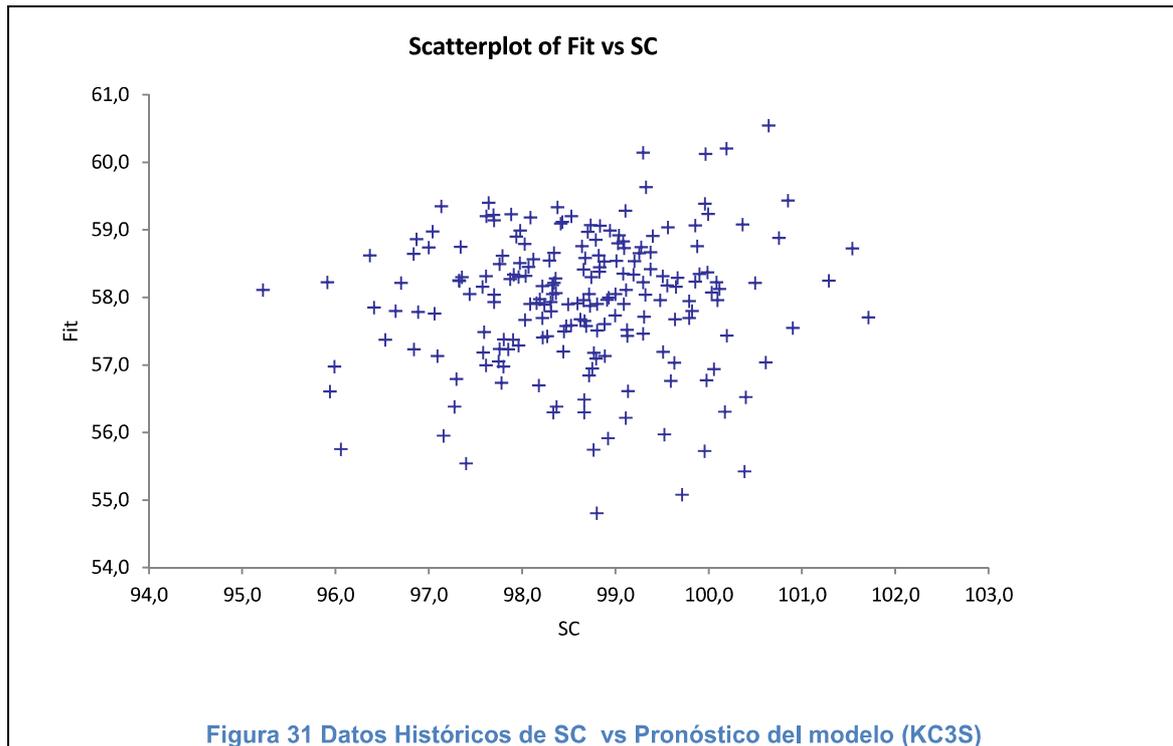
Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. (23 de Enero de 2015). [www.virtual.unal.edu.co](http://www.virtual.unal.edu.co). Obtenido de [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4030011/lecciones/cap3/cap\\_3\\_pag\\_15.html](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4030011/lecciones/cap3/cap_3_pag_15.html)

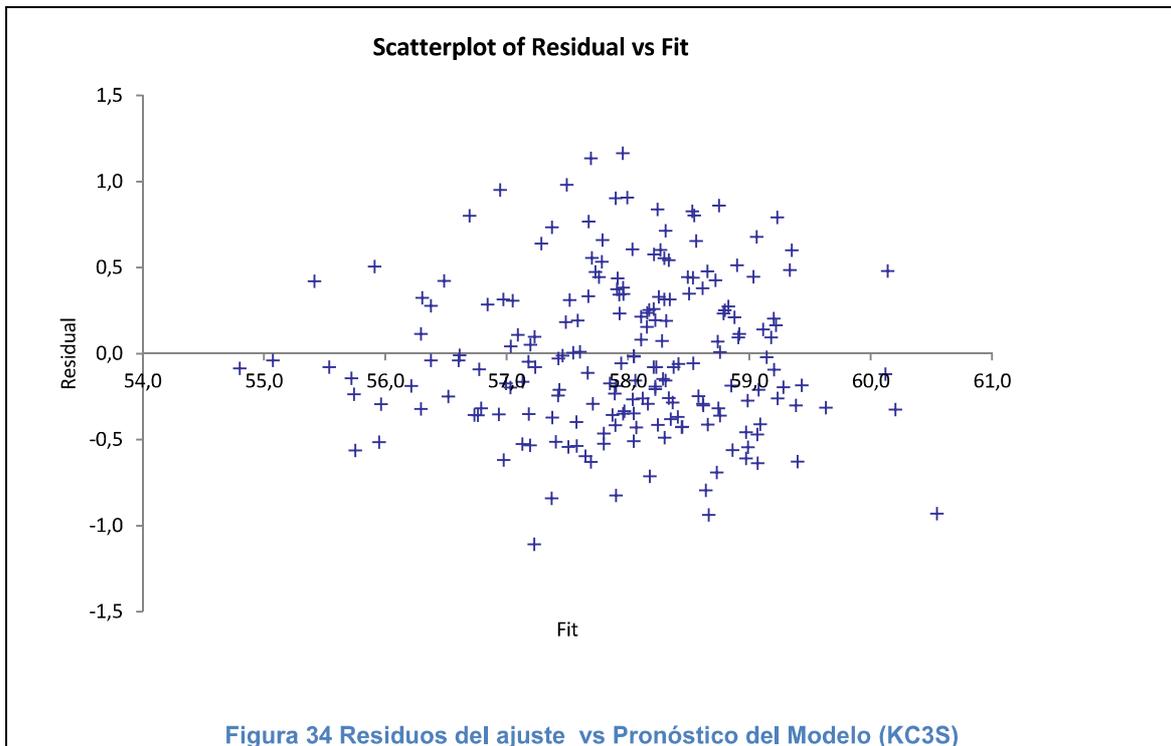
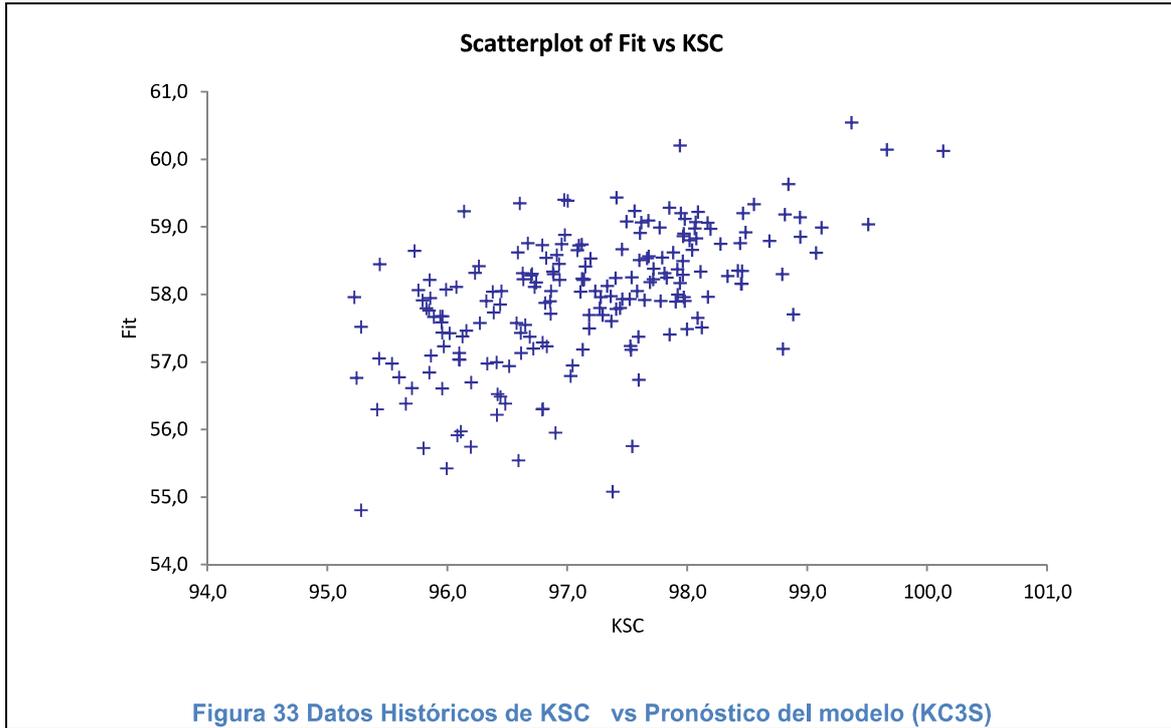
## **ANEXOS**

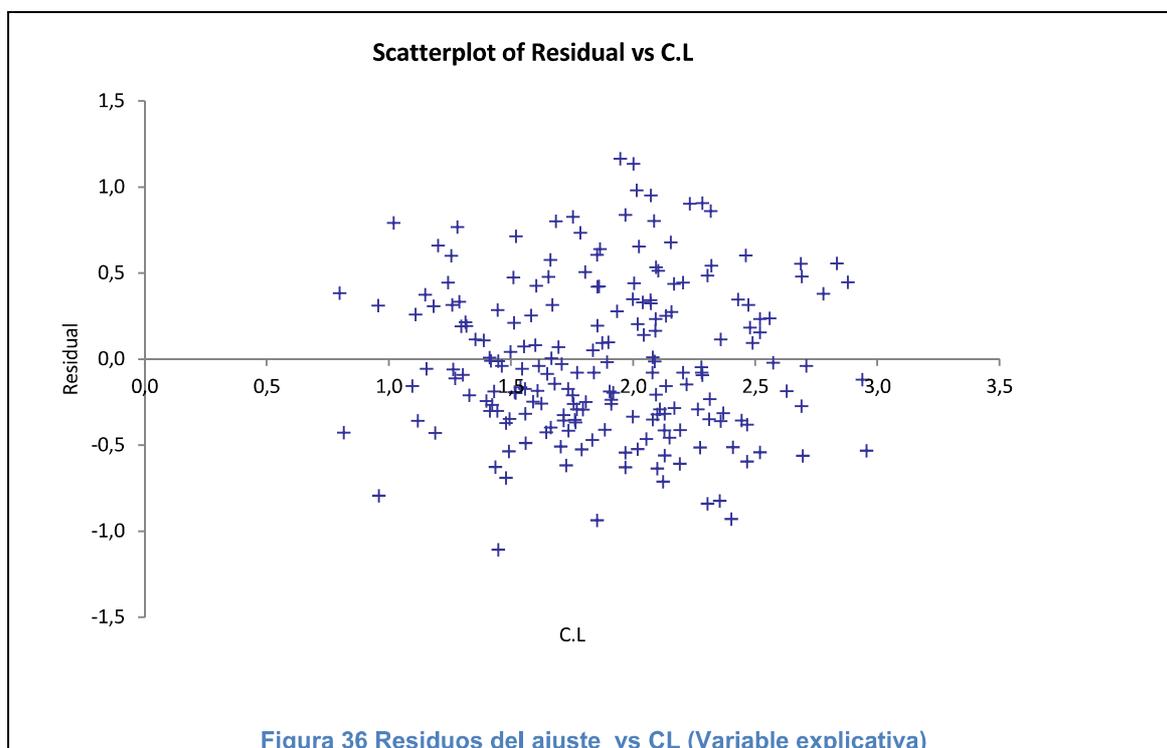
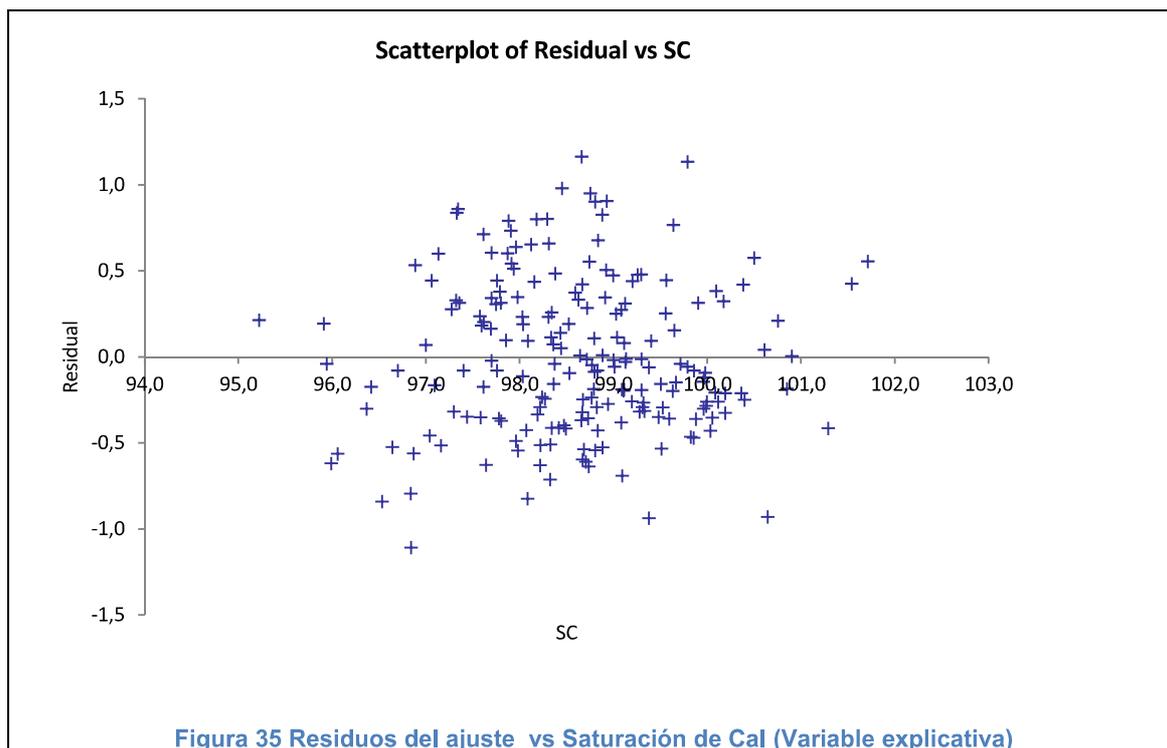
Tabla 39 Salida del Modelo de Ajuste Corrido en Stat Tools.

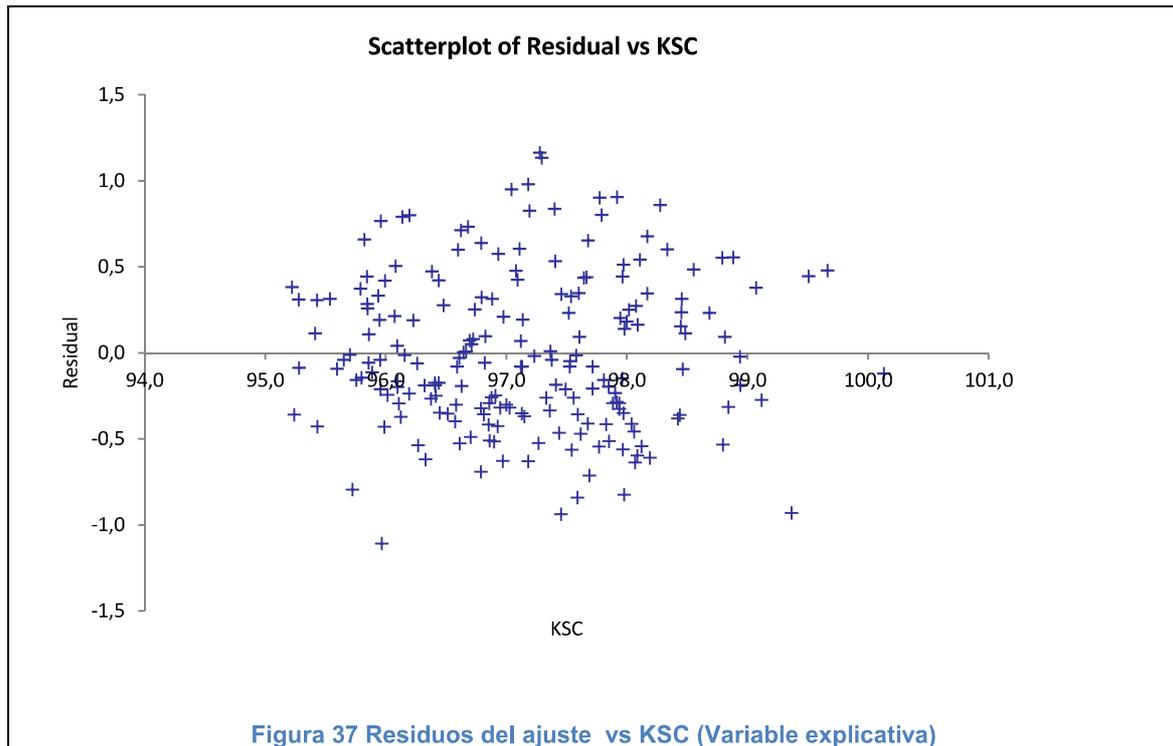
<b>StatTools Report</b>					
Analysis: Chi-Squared Normality Test					
Performed By: Diego Moreno					
Date: miércoles, 22 de abril de 2015					
Updating: Live					
<b>Residual</b>					
<b>Chi-Square Test</b>	<b>Data Set #1</b>				
Mean	0,0000				
Std Dev	0,4461				
Chi-Square Stat.	6,7508				
p-Value	<b>0,3445</b>				
<b>Chi-Squared Bins</b>	<b>Bin Min</b>	<b>Bin Max</b>	<b>Actual</b>	<b>Normal</b>	<b>Distance</b>
Bin # 1	-1,1092	-0,8566	3	4,1727	0,3296
Bin # 2	-0,8566	-0,6039	10	12,0376	0,3449
Bin # 3	-0,6039	-0,3512	33	25,4011	2,2733
Bin # 4	-0,3512	-0,0985	44	39,2131	0,5844
Bin # 5	-0,0985	0,1542	36	44,2922	1,5524
Bin # 6	0,1542	0,4068	32	36,6064	0,5797
Bin # 7	0,4068	0,6595	25	22,1359	0,3706
Bin # 8	0,6595	0,9122	12	9,7924	0,4977
Bin # 9	0,9122	1,1649	4	3,1684	0,2183











**Tabla 40 Base de datos de pronósticos del Modelo**

<i>Graph Data</i>	KC3S	Fit	Residual	SC	C.L	KSC
1	59,081	58,244	0,837	97,331	1,969	97,403
2	57,925	57,287	0,638	97,963	1,865	96,793
3	57,289	56,974	0,314	97,801	1,261	95,538
4	56,419	55,913	0,505	98,923	1,805	96,082
5	56,604	56,613	-0,009	99,136	1,418	95,704
6	56,629	56,306	0,322	100,175	2,073	96,795
---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---
10	59,951	59,351	0,599	97,135	1,256	96,602
196	58,476	57,496	0,979	98,451	2,016	97,182
197	59,123	57,958	1,164	98,662	1,949	97,279
198	59,357	58,531	0,825	98,882	1,7543	97,194
199	59,350	58,547	0,802	98,295	2,087	97,791