



FACULTAD DE INGENIERÍA
Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado

Análisis Comparativo de las Implicaciones Económicas entre la
NSR-98 y NSR-10
(Caso de Estudio en la Ciudad de Bogotá)

Presentado por:
Andrea Aranguren Sedano

Director
Harold Alberto Muñoz M.

Bogotá D.C.
Noviembre de 2011

Análisis Comparativo de las Implicaciones Económicas entre la NSR-98 y NSR-10 (Caso de Estudio en la Ciudad de Bogotá)

RESUMEN

El cambio en la normatividad sismo resistente genera modificaciones en los parámetros de diseño, que inciden en los costos de la estructura de un proyecto afectando directamente a la industria de la construcción. En consecuencia se crea la necesidad de establecer la variación y prever los costos estructurales. El presente documento determina la variación de parámetros relacionados con el análisis, diseño y características de la configuración estructural que afectan el costo. Se establece el impacto económico mediante el análisis y diseño de edificaciones de concreto reforzado con sistema combinado de resistencia sísmica según la NSR-98 y NSR-10, con el grado de detalle suficiente para poder evaluar su costo. Se establece que el cambio en el costo de la estructura está determinado por las modificaciones en los parámetros sísmicos y la configuración de la edificación, sin embargo la variación final de los costos asociados a la actualización de la norma sismo resistente no es significativa.

Palabras claves: Norma sismo resistente, Impacto económico, NSR-98, NSR-10.

ABSTRACT

The change in earthquake regulation generates changes in resistant design parameters that influence the costs of a project structure directly affecting the construction industry, thus creating the need for variation and provide structural costs. This document defines the variation of parameters related to the analysis, design and configuration characteristics that affect the structural cost. Economic impact is established through the analysis and design of reinforced concrete buildings for earthquake resistance combined system according to the NSR-98 and NSR-10, in sufficient degree of detail to assess their cost. It is established that change in cost structure is determined by changes in the seismic design parameters and the configuration of the building, however the final variation of the costs associated to updating the earthquake-resistant standard is not meaningful.

Keywords: Regulation for earthquake resistant buildings, Economic impact, NSR-98, NSR-10.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	MARCO DE REFERENCIA	9
2.1.	MARCO CONCEPTUAL	9
2.1.1.	SISMICIDAD EN COLOMBIA.....	9
2.1.2.	ZONAS Y ESTUDIOS DE AMENAZA SÍSMICA	11
2.1.3.	EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVIDAD SISMO RESISTENTE.....	19
2.1.4.	SISTEMAS ESTRUCTURALES DE RESISTENCIA SÍSMICA.....	20
4.1.4	MÉTODO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	21
2.1.5.	PRINCIPALES MODIFICACIONES EN LA NSR-10	24
2.1.5.1.	EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.	24
2.1.5.2.	MODULO DE ELASTICIDAD	28
2.1.5.3.	IRREGULARIDADES Y AUSENCIA DE REDUNDANCIA	29
2.1.5.4.	COMBINACIONES DE CARGA Y NUEVOS FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA.....	34
2.1.5.5.	OTROS CAMBIOS	36
2.2.	MARCO TEÓRICO.....	37
3.	MATERIALES Y/O MÉTODOS	40
3.1.	DEFINICIÓN DE LOS PROYECTOS A EVALUAR.....	40
3.2.	ANÁLISIS COMPARATIVO NSR-98 Y NSR-10	40
3.3.	ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL SEGÚN LAS NSR-98 Y NSR-10.....	45
4.	RESULTADOS	49
4.1.	CARACTERÍSTICAS DE LOS PROYECTOS EVALUADOS.....	49
4.2.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE LOS PROYECTOS CONSIDERANDO INDIVIDUALMENTE PARÁMETROS DE DISEÑO.....	59
4.2.1.	CAMBIO MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ.....	59
4.2.2.	CAMBIO MODULO DE ELASTICIDAD	62
4.2.3.	CAMBIO IRREGULARIDADES Y AUSENCIA DE REDUNDANCIA	63
4.4.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE PRESUPUESTOS DE LOS PROYECTOS SEGÚN NSR-98 Y NSR-10.....	71
5.	DISCUSIÓN	78
6.	CONCLUSIONES	81
7.	BIBLIOGRAFÍA	83

FIGURAS

Figura 1 Zonas de amenaza sísmica NSR-98.....	12
Figura 2 Mapa de valores de Aa NSR-98	13
Figura 3 Zonas de amenaza sísmica en función de Aa y Av NSR-10.....	14
Figura 4 Mapa de valores de Aa NSR-10	15
Figura 5 Mapa de valores de Av NSR-10.....	16
Figura 6 Método actualización Microzonificación Sísmica de Bogotá	26
Figura 7 Reducción del valor de R para estructuras irregulares NSR-98 y NSR-10.....	33
Figura 8 Combinaciones de carga para el método de la resistencia según NSR-98	34
Figura 9 Combinaciones de carga para el método de la resistencia según NSR-10	35
Figura 10 Método para determinar el impacto del cambio de los parámetros de diseño analizándolos individualmente.....	44
Figura 11 Diagrama de flujo del diseño sismo resistente de un edificio	46
Figura 12 Proyecto 1 planta arquitectónica.....	50
Figura 13 Proyecto 2 planta arquitectónica.....	51
Figura 14 Proyecto 3 planta arquitectónica.....	52
Figura 15 Proyecto 1 configuración del modelo estructural	53
Figura 16 Proyecto 2 configuración del modelo estructural	54
Figura 17 Proyecto 2 configuración del modelo estructural	55
Figura 18 Espectro de diseño Microzonificación Sísmica de Bogotá 1997	56
Figura 19 Comparación espectro de aceleraciones Proyecto 1 Microzonificación Sísmica de Bogotá57	
Figura 20 Comparación espectro de aceleraciones Proyecto 2 Microzonificación Sísmica de Bogotá58	
Figura 21 Comparación espectro de aceleraciones Proyecto 3 Microzonificación Sísmica de Bogotá58	
Figura 22 Variación aceleración espectral para los proyectos.....	59
Figura 23 Resultados rigidez sentido X	61
Figura 24 Resultados rigidez sentido Y	62
Figura 25 Variación del coeficiente de capacidad de disipación de energía	64
Figura 26 Comparación cantidades de acero de refuerzo analizando parámetros individuales.....	65
Figura 27 Comparación cantidades de concreto analizando parámetros individuales.....	65
Figura 28 Índices acero de refuerzo según NSR-98 y NSR-10	68
Figura 29 Cantidades de concreto según NSR-98 y NSR-10	69
Figura 30 Índices de costo según NSR-98 y NSR-10.....	77

TABLAS

Tabla 1. Formulas Ec NSR-98 y NSR-10.....	29
Tabla 2. Irregularidades en planta NSR-98.....	30
Tabla 3. Irregularidades en altura NSR-98.....	30
Tabla 4. Irregularidades en planta NSR-10.....	31
Tabla 5. Irregularidades en altura NSR-10.....	32
Tabla 6. Coeficientes de reducción de resistencia NSR-98 y NSR-10.....	36
Tabla 7. Factores cantidades de acero y concreto.....	43
Tabla 8. Características de los proyectos.....	49
Tabla 9. Proyectos, Zona de la Microzonificación Sísmica de Bogotá.....	56
Tabla 10. Equivalencia zonas de los proyectos según la NSR-98 y NSR-10.....	57
Tabla 11. Periodos de la estructuras según NSR-98 y NSR-10.....	59
Tabla 12. Datos del análisis con la NSR-98.....	60
Tabla 13. Datos del análisis cambiando el parámetro Microzonificación de Bogotá.....	60
Tabla 14. Variaciones cambio Microzonificación Sísmica de Bogotá.....	62
Tabla 15. Coeficiente de capacidad de disipación de energía e irregularidades.....	63
Tabla 16. Coeficiente de capacidad de disipación de energía, irregularidades y ausencia de redundancia.....	63
Tabla 17. Variaciones cambio irregularidades y ausencia de redundancia.....	64
Tabla 18. Variaciones cantidades de acero de refuerzo para los parámetros de análisis.....	67
Tabla 19. Variaciones cantidades de concreto para los parámetros de análisis.....	68
Tabla 20. Variación acero de refuerzo NSR-98 y NSR-10.....	69
Tabla 21. Variación concreto NSR-98 y NSR-10.....	69
Tabla 22. Presupuesto proyecto 1 NSR-98.....	72
Tabla 23. Presupuesto proyecto 1 NSR-10.....	73
Tabla 24. Presupuesto proyecto 2 NSR-98.....	74
Tabla 25. Presupuesto proyecto 2 NSR-10.....	75
Tabla 26. Presupuesto proyecto 3 NSR-98.....	76
Tabla 27. Presupuesto proyecto 3 NSR-10.....	76
Tabla 28. Variación de índices de costos NSR-98 y NSR-10.....	77

1. INTRODUCCIÓN

El cambio de normatividad sismo resistente obedece a la necesidad de actualizar el reglamento para incorporar los avances tecnológicos que permitan corregir los problemas evidenciados en sismos recientes. Adicionalmente la reglamentación, debe adaptarse a la investigación, avances en el diseño estructural, nuevos materiales, procesos constructivos y en general debe responder a las necesidades y requerimientos de la industria de la construcción en el país.

La primera reglamentación en materia de sismo resistencia se expidió en 1984 con el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes CCCSR-84. Posteriormente esta normatividad fue actualizada mediante el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-98. La segunda actualización fue expedida en el 2010 y es el documento Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. La primera reglamentación y sus actualizaciones responden a la necesidad de crear parámetros de diseño y construcción de edificaciones sismo resistentes y que estos sean actualizados, para lo cual la normatividad colombiana permite realizar modificaciones periódicas teniendo en cuenta que son documentos técnicos que requieren actualización.

El cambio de normatividad sismo resistente, genera cambios y nuevos requisitos en el diseño y construcción de edificaciones. Por este motivo se crea la necesidad de establecer cuál es la incidencia de la aplicación de la reglamentación. Específicamente en la industria de la construcción, se ha motivado la investigación para establecer los costos asociados a la actualización de la normatividad.

La reciente actualización de la normatividad sismo resistente crea la necesidad de evaluar comparativamente la NSR-10 con respecto a la NSR-98 para prever los costos estructurales que constituyen elementos importantes en el análisis de la factibilidad de un proyecto. Adicionalmente el estudio del cambio de parámetros

relevantes que inciden en el costo de la estructura, genera bases para concebir proyectos que no solo se comporten adecuadamente ante solicitaciones sísmicas cumpliendo con los requisitos de la norma sismo resistente, si no que adicionalmente sean viables económicamente.

El objetivo general del presente trabajo es analizar el impacto económico del cambio de normatividad sismo resistente en edificaciones de concreto reforzado con sistemas combinados de resistencia sísmica localizados en la ciudad de Bogotá. Las edificaciones cumplen con los requisitos para ser analizadas con el método de la fuerza horizontal equivalente.

Inicialmente se pretende identificar cambios en parámetros relevantes para el diseño sismo resistente entre la NSR-98 y NSR-10, estos incluyen modificaciones relacionadas con el análisis y el diseño del sistema de resistencia sísmica de una edificación. Para identificar el impacto de las modificaciones de estos parámetros, se determinan teóricamente las cantidades de acero de refuerzo y de concreto cambiando individualmente los parámetros de diseño a evaluar.

Posteriormente se realiza el diseño estructural convencional de las edificaciones cumpliendo con los requisitos establecidos en la NSR-98 y NSR-10 para la ciudad de Bogotá, estos diseños incluyen los parámetros analizados inicialmente y adicionalmente todas las consideraciones en términos de diseño de edificaciones sismo resistentes, aplicadas de acuerdo con procedimientos convencionales de oficina de diseño estructural. Luego se determina el costo del sistema de resistencia sísmica de las edificaciones a partir de las cantidades de acero de refuerzo y concreto del diseño según los parámetros de la NSR-98 y NSR-10. Lo anterior se realizó para costos típicos de materiales, equipo y mano de obra en el país para el momento. Finalmente se evalúa el impacto económico en el sistema de resistencia sísmica en el diseño de una edificación con la NSR-98 y NSR-10.

En el Capítulo 1 se justifica el desarrollo del trabajo y se presentan los objetivos. El Capítulo 2 describe conceptos requeridos para el análisis y diseño de una edificación según la normatividad colombiana. Adicionalmente se hace referencia a estudios previos relacionados con el impacto de los costos derivados de cambios de la normativa colombiana y sus actualizaciones. El Capítulo 3 explica la metodología seguida en el desarrollo del presente trabajo. En el Capítulo 4 se presentan los resultados del trabajo divididos en tres partes. La primera describe las características de los proyectos evaluados. La segunda parte incluye los resultados de variación de los parámetros analizados individualmente. En la tercera parte de este capítulo se presentan los resultados del análisis y diseño detallado del sistema de resistencia sísmica de los proyectos y los costos asociados. En el Capítulo 5 se presenta la discusión de los resultados mencionados anteriormente y finalmente el Capítulo 6, presenta las conclusiones del trabajo. Se presentan los anexos correspondientes al cálculo de la fuerza sísmica y los análisis de precios unitarios de los presupuestos desarrollados en el presente trabajo.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. SISMICIDAD EN COLOMBIA

Colombia está localizada en la zona donde convergen las placas tectónicas de Nazca, Suramericana, Caribe y es considerado un territorio tectónicamente activo. Las principales fallas geológicas son Romeral, Murindó, Cauca, falla de Palestina, falla de Bucaramanga - Santa Marta, falla de Oca y falla frontal cordillera oriental. La mayoría de fallas tienen dirección norte sur [1].

El primer evento sismológico del cual se tiene registro ocurrió en 1541.

Luego en 1566 ocurre un sismo que afecta a las ciudades de Popayán y Cali. Posteriormente en 1644 ocurre el terremoto de Tunjuelo el cual causa daños graves a Bogotá y más adelante se destaca, debido a su magnitud estimada de 8.9 en la escala de Richter, el sismo ocurrido cerca a Tumaco en 1906 [2].

En 1983 ocurre el sismo en Popayán el cual afecta la ciudad y por el cual se evidencian problemas en cuanto a sistemas constructivos utilizados en el país y prácticas de construcción que crean la necesidad de expedir una normatividad para construcciones sismo resistentes el CCCSR-84, el cual incluyó el primer estudio general de amenaza sísmica del país[1].

Después del sismo de Popayán no se produjeron sismos que afectaron ciudades hasta 1992 con los sismos del Atrato Medio (Murindó) con magnitudes de 6.4 y 6.2 en la escala de Richter, y que afectaron principalmente a Medellín. Posteriormente en 1994 ocurre el sismo de Páez el cual afecta a la ciudad de Cali. En Enero de 1995 ocurre el sismo de Tauramena, Casanare y en febrero se presentó otro sismo que afectó los departamentos de Valle del Cauca y Choco [2].

Luego de la expedición de la NSR-98 en Enero de 1999 ocurre el sismo del Quindío, el cual afectó a las ciudades de Armenia y Pereira con una magnitud de 6.2, considerada moderada, sin embargo debido a la cercanía y superficialidad afectó considerablemente a la ciudad de Armenia. Este sismo ratificó la necesidad de la implementación de los requisitos mínimos para el diseño y construcción de edificaciones sismo resistentes en el país[1].

El sismo de Pizarro en el 2004 afectó a la ciudad de Cali, los daños que se presentaron fueron principalmente en elementos no estructurales. En Quetame, Cundinamarca en el año 2008 se produce un sismo de magnitud 5.7 el cual afectó a este municipio en gran medida y fue sentido en Bogotá [1].

2.1.2. ZONAS Y ESTUDIOS DE AMENAZA SÍSMICA

Según la NSR-98 en Colombia se definen tres zonas de amenaza sísmica, las cuales se cuantifican en términos de la aceleración horizontal del terreno esperada, con una probabilidad del 10% de ser excedidos en un lapso de 50 años.

Según lo anterior se definen zonas de amenaza sísmica en función del coeficiente que representa la aceleración pico efectiva para diseño Aa de la siguiente forma:

- Zona de amenaza sísmica baja: Conjunto de lugares en donde Aa es menor o igual a 0.10
- Zona de amenaza sísmica intermedia: Conjunto de lugares en donde Aa es mayor a 0.10 y menor a 0.20
- Zona de amenaza sísmica alta: Conjunto de lugares en donde Aa es mayor a 0.20

En la figura 1 se presenta el mapa de las zonas de amenaza sísmica según la NSR-98 [2].

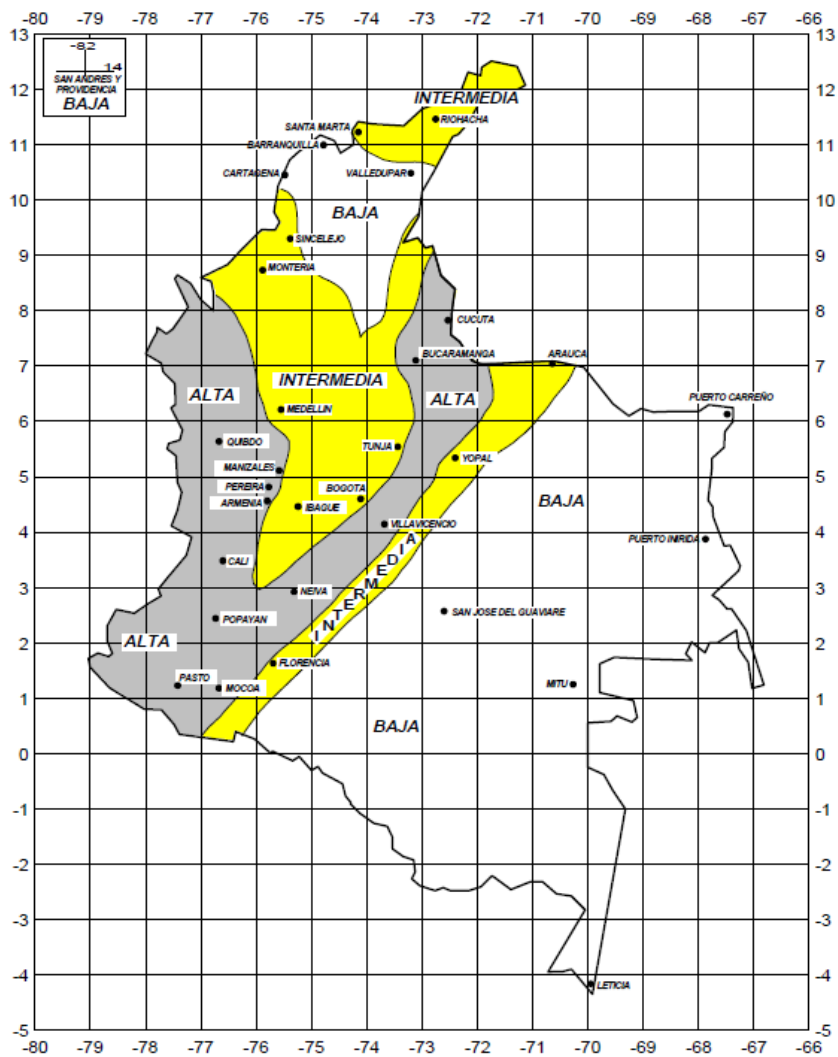


Figura 1 Zonas de amenaza sísmica NSR-98

Fuente: NSR-98

En la figura 2 se presenta el mapa de valores de Aa según la NSR-98.

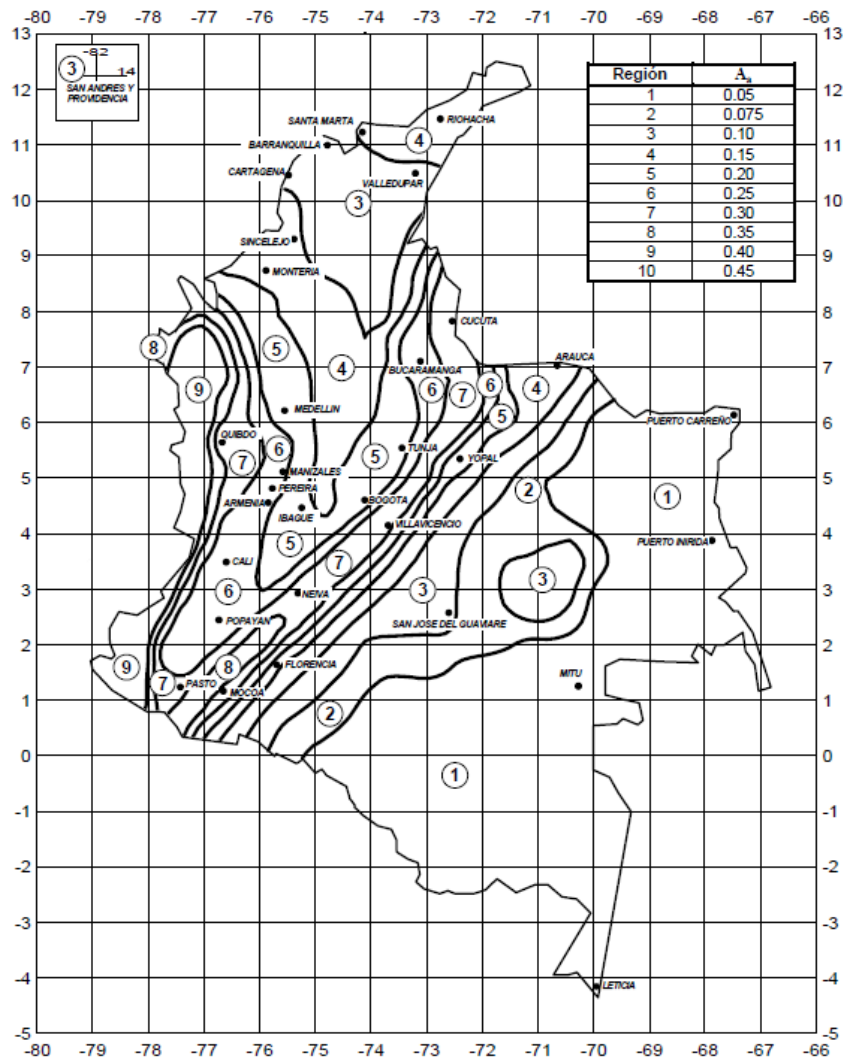


Figura 2 Mapa de valores de A_a NSR-98

Fuente: NSR-98

En la NSR-10 los movimientos sísmicos de diseño conservan el mismo nivel de probabilidad de excedencia, de la misma forma se definen por el parámetro A_a y se incluye el coeficiente que representa la velocidad pico efectiva A_v . Lo anterior debido a que basados en estudios realizados, A_a caracteriza los movimientos sísmicos del terreno causados por sismos relativamente cercanos en el rango de periodos de vibración de edificaciones entre 0.1 y 0.5 s, es decir para edificaciones entre 1 y 5 pisos. Por otra parte, A_v caracteriza los movimientos sísmicos fuertes

ocurridos a distancias moderadas para periodos de aproximadamente 1s, es decir para edificaciones de 10 pisos o más[1].

En síntesis, la definición de las zonas de amenaza sísmica para la NSR-10 se mantiene igual a la NSR-98, es decir los rangos para las diferentes zonas no se modifican sin embargo, ahora se definen de acuerdo a los valores de Aa y Av [1].

En la figura 3 se presenta el mapa de las zonas de amenaza sísmica según la NSR-10.

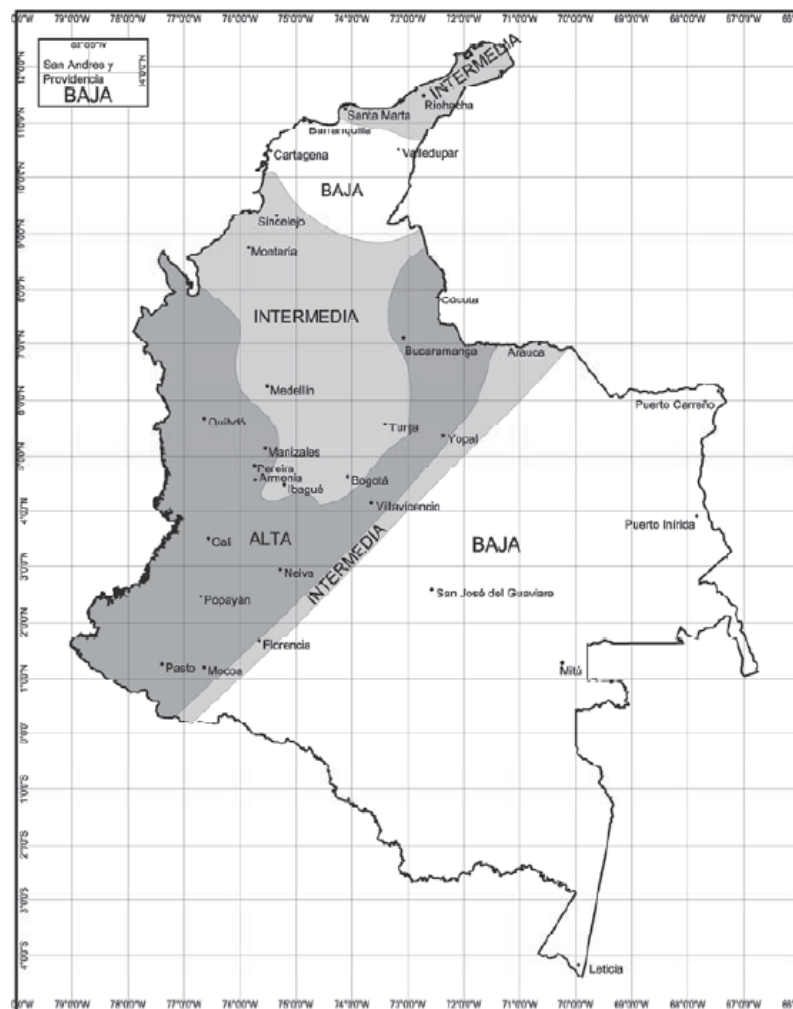


Figura 3 Zonas de amenaza sísmica en función de Aa y Av NSR-10

Fuente: NSR-10

En la figuras 4 y 5 se presentan los mapas de valores de Aa y Av según la NSR-10.

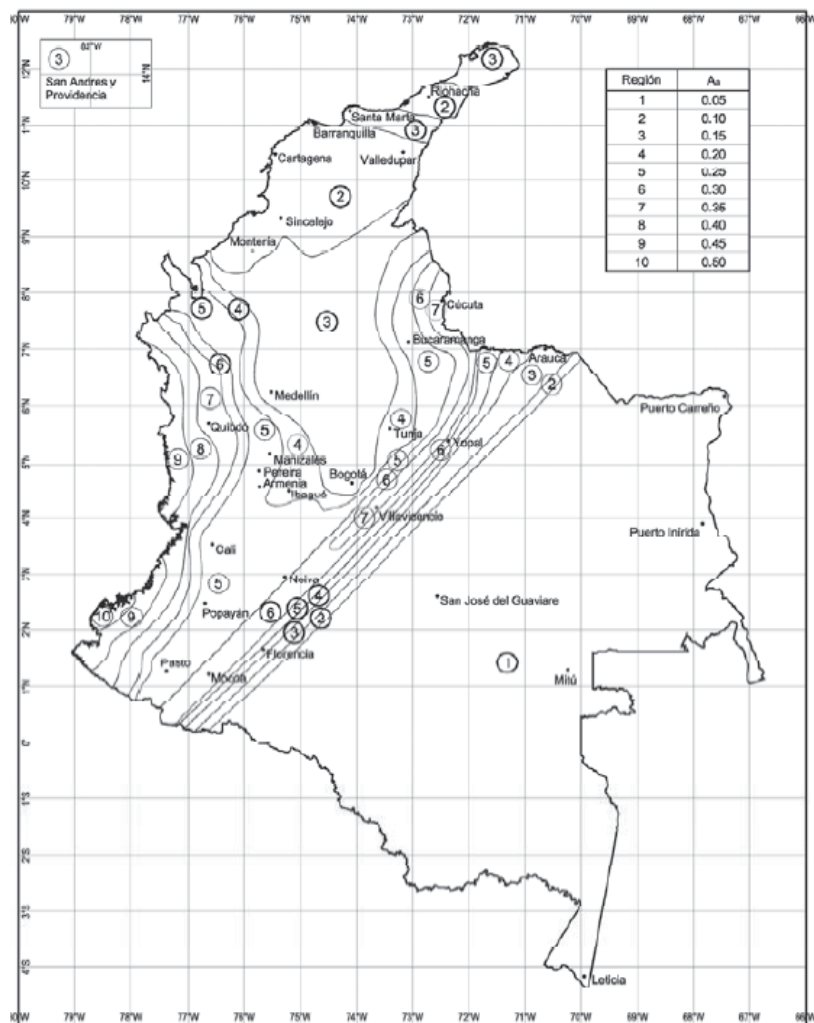


Figura 4 Mapa de valores de Aa NSR-10

Fuente: NSR-10

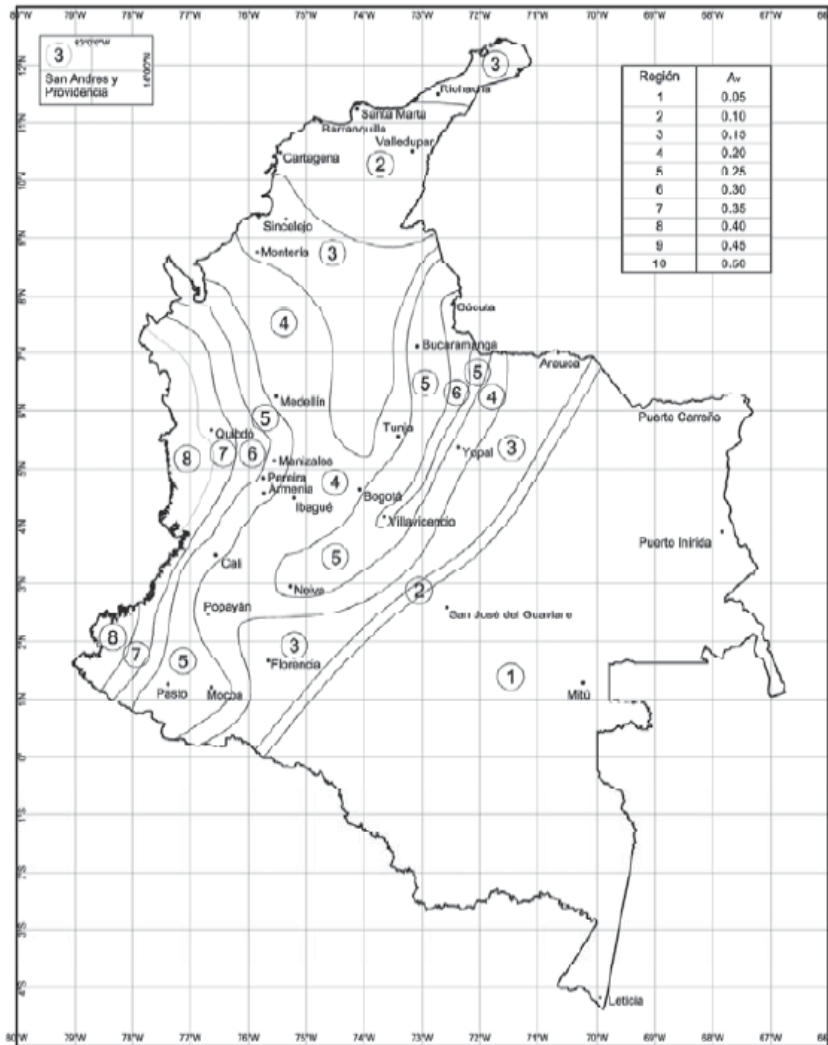


Figura 5 Mapa de valores de Av NSR-10

Fuente: NSR-10

De acuerdo a lo descrito anteriormente se destaca que en la NSR-10 el valor de Aa para la ciudad de Bogotá disminuyó de 0.20 a 0.15.

Los estudios de amenaza sísmica en el país iniciaron con la expedición de la primera reglamentación sismo resistente, luego este estudio fue actualizado en el 1996 y constituyo la base de los parámetros sísmicos de diseño de la NSR-98 [3].

El Estudio General de Amenaza sísmica de Colombia, realizado en Octubre de 1996 por el Comité AIS-300 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), formuló una explicación del proceso tectónico que está ocurriendo en el territorio colombiano y sus zonas vecinas, utilizando los catálogos existentes de sismos, se ensambló una base de datos sistematizada que permitiera manejar de forma adecuada los 11088 datos de eventos sísmicos que tiene el catálogo utilizado, definió una descripción matemática de la tectónica que permitiera hacer la asignación de los eventos sísmicos a cada uno de los accidentes tectónicos. Dentro de esta etapa, se digitalizó el mapa de Colombia y su tectónica con el fin de poder utilizar gráficas computarizadas. Una vez se dispuso de grupos de sismos provenientes de cada una de las fuentes, se determinaron las características estadísticas de cada uno de estos grupos a través de regresiones [3].

La anterior información fue actualizada recientemente para la expedición de la NSR-10 por lo que el actual (2011) catálogo colombiano de eventos sísmicos contiene sismos históricos (el primero que se tiene registro escrito ocurrido en 1541) e instrumentales y cuenta (a mayo de 2009) con 33100 eventos de magnitud Richter que va desde valores bajos hasta magnitudes Richter cercanas a 9. Gracias a la Red Sismológica Nacional adscrita al INGEOMINAS, que entró en operación en 1995, se registraron durante el lapso entre 1995 y 2009 cerca de 22000 eventos adicionales lo que permitió realizar un mejor estimativo de la amenaza sísmica nacional que en cualquier otra época en el pasado[3].

Utilizando un modelo probabilística de línea fuente se determinaron curvas de máxima aceleración horizontal esperada contra período de retorno en años, para diferentes niveles de incertidumbre en puntos seleccionados del territorio nacional y en las principales ciudades del país [3].

Se realizaron estudios de sensibilidad a diferentes parámetros, utilizando los valores obtenidos en las ciudades capitales de departamento. Con estos estudios

de sensibilidad fue posible definir los parámetros a utilizar en aquellos casos en que existían varias alternativas, y al mismo tiempo calibrar las diferencias, en términos de amenaza sísmica, que producían las diferentes alternativas. Con los valores definidos en el paso anterior se obtuvieron las curvas de igual aceleración máxima esperada para todo el territorio nacional [3].

Para la expedición de la NSR-10 se incluyeron los valores de diseño para la norma sismo resistente y adicionalmente se establecieron las bases para la realización de los estudios de microzonificación [3].

El comité AIS 300, encargado de la evaluación y zonificación de amenaza sísmica en la Asociación de Ingeniería Sísmica AIS, realizó el “Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009” mencionado anteriormente. Así mismo, el INGEOMINAS y la Universidad Nacional de Colombia realizaron el documento “Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia”. Como resultado de estos dos estudios se realizó el mapa de la zonificación sísmica de la NSR-10 [4].

A partir de los estudios mencionados anteriormente, se determinaron valores para la NSR-10 como el coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva para diseño A_a , el coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva para diseño A_v , el coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva reducida para diseño con seguridad limitada A_e y el coeficiente que representa la aceleración pico efectiva para el umbral de daño A_d . Los anteriores parámetros permiten construir los espectros de diseño, seguridad limitada y umbral de daño[1].

Adicionalmente, los resultados descritos permitieron elaborar los mapas de amenaza sísmica de la NSR-10 y los valores de aceleración definidos sirven como datos de entrada para estudios de microzonificación sísmica o estudios de sitio que requieran determinados proyectos [3].

2.1.3. EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVIDAD SISMO RESISTENTE

Antes de la expedición de la primera reglamentación sismo resistente en el país, fueron realizados varios esfuerzos para desarrollar requerimientos para el diseño de construcciones. Este fue el caso de la traducción de requisitos de la Asociación de Ingenieros estructurales SEAOC California por parte de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS en 1976. Posteriormente fue traducido el documento ATC-3 por parte de la AIS, el cual en el año de 1978 era considerado como un documento que reunía las últimas investigaciones en cuanto al diseño sismo resistente[5-6].

Luego con el apoyo de investigadores que habían colaborado en el desarrollo del ATC-3 se adaptó este documento a las condiciones del país y fue expedida la Norma AIS 100-81. Este trabajo fue desarrollado por la AIS con la colaboración de la Universidad de Illinois Champaign-Urbana y la Universidad de los Andes [6].

En 1984, luego del sismo de Popayán el gobierno nacional por medio del Decreto 1400 expide la primera reglamentación sismo resistente CCCSR-84. Este reglamento fue actualizado por medio del Decreto 33 del 9 de enero de 1998, el cual se denominó “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente”, NSR-98. La segunda actualización del reglamento se expide el 19 de marzo del 2010 por medio del decreto 926. Esta segunda actualización es el “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente” NSR-10, el cual reemplaza el Reglamento NSR-98 [1].

2.1.4. SISTEMAS ESTRUCTURALES DE RESISTENCIA SÍSMICA

En la NSR-98 y NSR-10 se permite el uso de cuatro sistemas estructurales, esta clasificación tiene en cuenta el tipo de sistema de resistencia sísmica dependiendo de la forma como se resisten tanto las fuerzas verticales como las horizontales, según lo anterior la edificación debe clasificarse dentro de una de estas categorías[7].

- Sistema de muro de carga
- Sistema combinado
- Sistema de pórtico
- Sistema dual

A continuación se describe el sistema combinado objeto del presente estudio, para que un sistema sea clasificado en esta categoría se pueden presentar dos casos. El primero, en el cual las cargas verticales son resistidas por un pórtico no resistente a momentos, esencialmente completo y las cargas debidas al sismo son resistidas por muros estructurales o pórticos con diagonales[1].

El segundo caso se presenta cuando las cargas verticales y horizontales son resistidas por un pórtico resistente a momentos esencialmente completo y muros estructurales o pórticos con diagonales. En este caso un sistema se clasifica como combinado siempre que no cumpla con los requisitos de un sistema dual[1].

Los requisitos de un sistema dual son los siguientes:

Las cargas verticales las debe tomar un pórtico esencialmente completo resistente a momentos y sin diagonales.

Las fuerzas horizontales son resistidas por una acción combinada de muros estructurales o pórticos con diagonales y el pórtico resistente a momentos, el cual actuando independientemente debe diseñarse para que resista como mínimo el 25% del cortante sísmico en la base.

La totalidad del cortante sísmico en la base debe ser resistida por los dos sistemas, considerando la interacción en todos los niveles de la edificación. Sin embargo en ningún caso la resistencia de los muros estructurales o los pórticos con diagonales puede ser menor del 75% del cortante sísmico en la base[1].

4.1.4 MÉTODO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En la NSR-10 se especifican los siguientes métodos reconocidos de análisis estructural [1].

- Método de la fuerza horizontal equivalente
- Métodos de análisis dinámico elástico
- Métodos de análisis dinámico inelástico
- Métodos de análisis alterno.

Entre estos métodos el de la Fuerza Horizontal Equivalente FHE es el más utilizado y abarca gran parte de las estructuras que se diseñan en el país. Igualmente se establece en la NSR-98. Consiste en simplificar el comportamiento dinámico de la estructura a la consideración únicamente del modo de vibración fundamental. De esta forma se reemplaza la magnitud de la fuerza sísmica por un conjunto de fuerzas horizontales equivalentes aplicadas en los niveles de los pisos del edificio que equilibran el cortante de base [7-8].

La metodología de la FHE es aplicable a edificaciones que cumplan con los siguientes requisitos[1]:

- Todas la edificaciones, regulares e irregulares en zonas de amenaza sísmica baja.
- Todas las edificaciones, regulares e irregulares, que pertenezcan al grupo de uso I, localizadas en zonas de amenaza sísmica intermedia.

- Edificaciones regulares, de 20 niveles o menos y 60 m de altura o menos medidos desde la base, en cualquier zona de amenaza sísmica, exceptuando edificaciones localizadas en lugares que tengan un perfil de suelo tipo D, E o F, con periodos de vibración mayores de 2 veces el período de vibración, en segundos, correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño, para períodos cortos, y la parte descendiente del mismo.
- Edificaciones irregulares que no tengan más de 6 niveles ni más de 18 m de altura medidos a partir de la base,
- Estructuras flexibles apoyadas sobre estructuras más rígidas que cumplan los requisitos descritos en la NSR-10 sección A.3.2.4.3.

4.1.4 ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL

En la NSR-10 se establece el procedimiento de diseño para edificaciones nuevas, en este se especifican los pasos y parámetros requeridos en el análisis estructural de edificaciones que cumplan con los requisitos mínimos para edificaciones sismo resistentes. A continuación se describe el procedimiento descrito en la normatividad NSR-10.

Paso 1. Pre-dimensionamiento y coordinación con los otros profesionales.

En este paso se define el sistema estructural y las cargas de la estructura (cargas muertas y cargas vivas).

Paso 2. Evaluación de las solicitaciones definitivas.

Paso 3. Obtención del nivel de amenaza sísmica.

Se identifica el nivel de amenaza sísmica del lugar del proyecto y los parámetros sísmicos necesarios para el diseño.

Paso 4. Movimientos sísmicos de Diseño.

Se determina el espectro elástico de diseño a partir de los parámetros sísmicos y el coeficiente de importancia.

Paso 5. Características de la estructuración y del material estructural empleado.

Paso 6. Grado de irregularidad de la estructura y procedimiento de análisis.

De acuerdo al grado de irregularidad, sistema estructural de resistencia sísmica escogido, altura y nivel de amenaza sísmica se determina el método de análisis estructural para la edificación.

Paso 7. Determinación de las fuerzas sísmicas

Paso 8. Análisis sísmico de la estructura

El análisis se realiza para la fuerza sísmica de diseño sin ser dividida por el coeficiente de disipación de energía R por el método definido en el paso 6.

Paso 9. Desplazamientos Horizontales.

Calculo de las derivas de la edificación

Paso 10. Verificación de las derivas

Comprobar que las derivas obtenidas cumplan con los valores de deriva permitidos por la normatividad.

Paso 11. Combinación de las diferentes solicitaciones.

Se obtienen las diferentes combinaciones de carga, en este paso los efectos sísmicos deben ser divididos por el coeficiente de disipación de energía.

Paso 12. Diseño de los elementos estructurales.

El diseño se realiza para los valores más desfavorables obtenidos en el paso anterior y los elementos deben detallarse de acuerdo a los requisitos del grado de disipación de energía de la estructura definido previamente.

2.1.5. PRINCIPALES MODIFICACIONES EN LA NSR-10

2.1.5.1. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.

De acuerdo con el Mapa de Amenaza sísmica la ciudad de Bogotá D.C. posee Amenaza Sísmica Intermedia y la contribución de las fallas en el rango de 0.05g son las siguientes:

Falla Frontal Cordillera Oriental (67.6%)

A todo lo largo de la margen oriental de la Cordillera Oriental, se prolonga una amplia zona de callamiento de tipo compresional. Existen numerosos sismos de todo tipo de magnitud y de profundidades focales que llegan hasta unos 50 o 60 km que son asociables a la actividad de esta zona de callamiento[4].

La falla frontal de la Cordillera Oriental conforma uno de los sistemas principales más activos de los Andes del Norte, el cual se prolonga hasta el Golfo de Guayaquil. Los dos grandes sismos ocurridos en 1827 y 1834 sirven de apoyo a esta hipótesis[4].

El tipo de apoyo de callamiento, su longitud y su posición, se combinan con los parámetros de sismicidad para asignar a la Falla Frontal de la Cordillera Oriental una magnitud última posible de 8 en la escala M_s . La ciudad de Bogotá se encuentra bastante cercana a esta falla que buza aproximadamente 45° W-NW en el sector norte y 60° W-nW en el sector sur. La falla presenta distintos segmentos

dispuestos en relevo lo cual sugiere una componente de movimiento de rumbo en sentido lateral derecho. La longitud media de los segmentos mayores oscilan entre 60 y 80 km, representando fuentes sismogénicas de alta capacidad destructora[4].

Falla Salinas (27.7%)

Se considera una falla de tipo inverso con buzamiento al este cuya traza se aprecia en la zona central del país con rumbo sensiblemente norte sur y longitud superior a 150 km. Esta falla afecta el flanco este de la Cordillera Oriental. Se le ha asignado una magnitud última igual a 6.5 M_s [4].

Falla Ibagué (0.4%)

Este accidente de dirección N75°E se extiende desde el flanco oriental de la Cordillera Central hasta el flanco occidental de la Cordillera Oriental, cruzando el Valle del Magdalena. La falla de Ibagué tiene un movimiento de rumbo lateral derecho compatible con el esfuerzo principal compresivo σ_1 en el sector (E-W). El plano de falla es sub-vertical y las rupturas superficiales afectan sedimentos del Plioceno y el Holoceno en el abanico de Ibagué, lo cual permite catalogarla como activa. El movimiento lateral derecho se absorbe a lo largo de fallas inversas de dirección N-S situadas al norte del accidente en el flanco occidental de la Cordillera Oriental (Fallas de Cambao, Honda) [4].

Específicamente en la ciudad de Bogotá la actualización de la microzonificación sísmica inicio desde el año 2007. El objetivo general del estudio era actualizar la amenaza sísmica, modelo geológico, geotécnico y respuesta sísmica para la ciudad. La figura 6 muestra el diagrama metodológico del estudio para la actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá.

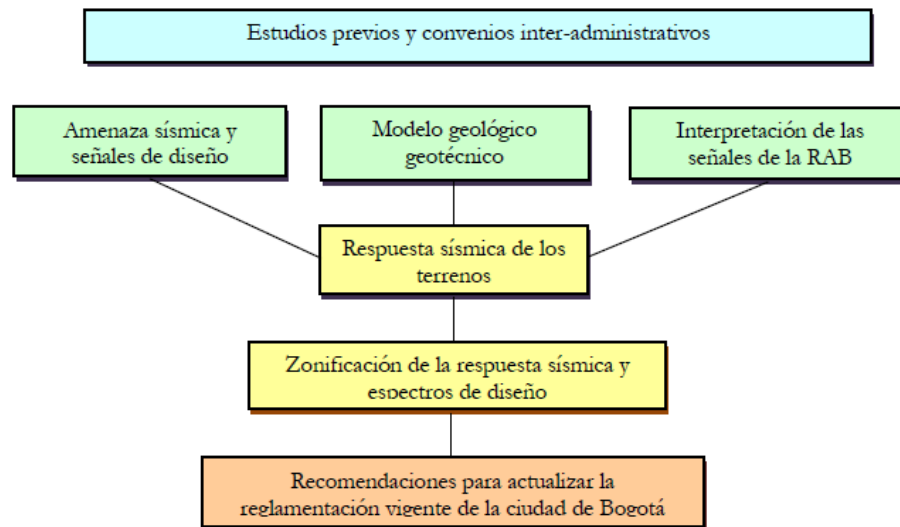


Figura 6 Método actualización Microzonificación Sísmica de Bogotá

Fuente: Diaz-Parra F.J.

Luego de la publicación del primer estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá se realizaron una serie de convenios encaminados a la actualización de la Microzonificación. El primer convenio entre el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias FOPAE y la universidad de los Andes incluyó el estudio de la respuesta dinámica del subsuelo y la obtención de espectros de amenaza uniformes para presentar una propuesta de zonificación. Adicionalmente se implementó el sistema SISBog V1.0 para la visualización de los resultados de los análisis de amenaza realizados[4].

Después se realizó el convenio entre el FOPAE y la Sociedad Colombiana de Geotecnia en el cual se propuso un modelo geotécnico, se evaluó la respuesta sísmica del subsuelo a partir de un análisis bidimensional y se revisó la microzonificación para Bogotá. Finalmente se presentaron propuestas para su actualización[4].

El tercer convenio se realizó entre el FOPAE y la AIS, el objeto de este fue considerar el comportamiento no lineal del subsuelo y evaluar el efecto en

periodos estructurales para determinar posibles situaciones críticas. Adicionalmente se realizó una revisión de la microzonificación y se plantearon propuestas para su actualización [4].

El estudio de actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá incluyó el mapa de zonificación geotécnica el cual conservo las cinco unidades geotécnicas identificadas en estudios previos, cerros, piedemonte, lacustre, aluvial y llanura de inundación. Su principal cambio consistió en una mayor delimitación y subdivisión de las zonas de piedemonte, y adicionalmente en planicie, las zonas lacustre, lacustre aluvial y llanura de inundación. Se destaca que la zonificación se basó en el carácter geotécnico y no geológico como se había definido en los estudios previos[4].

Luego de realizar una serie de modelos de la respuesta sísmica basados en los resultados geotécnicos se definió el mapa de zonificación de respuesta sísmica. A partir de los resultados de la modelación unidimensional y bidimensional se definieron las zonas de respuesta sísmica. De las 31 zonas geotécnicas que se tomaron para el análisis de la respuesta sísmica, para consideraciones de diseño, se simplificaron en 15 zonas uniformes y 1 zona de tratamiento especial que corresponde a los depósitos de ladera. Sin embargo las zonas de respuesta sísmica se basan en 5 zonas: cerros, piedemonte, lacustre, lacustre aluvial y aluvial, las cuales se subdividieron para definir las 15 zonas mencionadas anteriormente. Estas tienen información de descripción geotécnica, espesor del depósito, intervalo de periodo fundamental del suelo y posibles efectos de sitio relacionados[4].

Para cada zona propuesta se determinaron los espectros uniformes de amenaza en superficie. Los cuales deben ser modificados por parámetros de amplificación para ser utilizados en el diseño de edificaciones bajo los parámetros de la NSR-10. Los factores de amplificación son F_a , coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos ($T < 1s$) asociado a la

aceleración y F_v coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios ($T=1s$) asociado a la velocidad[1].

Los valores de F_a más altos se presentan en las zonas de piedemonte y cerros debido al efecto topográfico y los valores más bajos se presentan en las zonas lacustres debido al espesor de los depósitos de suelos. En cuanto a F_v se encuentran valores altos en zonas lacustres y bajos en cerros y piedemonte. Las zonas aluviales tienen valores intermedios entre los valores de piedemonte y lacustre para F_a y F_v [4].

Comparativamente los espectros del estudio de Microzonificación de 1997 son menores a los descritos en el estudio de la actualización (decreto 523 de 2010) esto se debe principalmente a que los niveles de aceleración máxima del terreno para periodos cortos disminuyeron debido a que el valor de A_a disminuyó de 0.2 a 0.15 g. Para periodos medios y altos los valores del espectro disminuyeron como consecuencia del análisis de la forma de la curva con control de velocidades y desplazamientos espectrales [4].

2.1.5.2. MODULO DE ELASTICIDAD

El valor del módulo de elasticidad del concreto E_c para el análisis de una estructura tanto en la NSR-98 como en la NSR-10 se calcula a partir de la resistencia a la compresión del mismo. El valor puede ser determinado sin distinguir el tipo de agregado del concreto y la formula se basa en la experimentación realizada a nivel nacional. Debido a la realización de estudios previos a la expedición de la NSR-10 relacionados con el valor del módulo de elasticidad, la ecuación para determinar E_c en función de la resistencia a la compresión del concreto fue modificada, en la tabla 1 se presenta el cambio del factor de la ecuación para la NSR-98 y NSR-10 [1-2].

Tabla 1. Formulas Ec NSR-98 y NSR-10

Unidades	Módulo de elasticidad del concreto	
	NSR-98	NSR-10
MPa	$3900 \sqrt{f_c}$	$4700 \sqrt{f_c}$
kgf/cm ²	$12500 \sqrt{f_c}$	$15100 \sqrt{f_c}$

2.1.5.3. IRREGULARIDADES Y AUSENCIA DE REDUNDANCIA

Para el diseño de edificaciones, el coeficiente de capacidad de disipación de energía básico R_o , determina la energía que una estructura puede disipar en el rango inelástico. Este coeficiente es función del sistema de resistencia sísmica y los requisitos de diseño y detallado para el grado de disipación de energía correspondiente al material estructural empleado. En la NSR-98 el coeficiente R_o se multiplica por los coeficientes de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidades en altura Φ_a y en planta Φ_p , para obtener el coeficiente de modificación de respuesta R ver figura 7 [1-2].

Este coeficiente se utiliza para determinar los efectos sísmicos reducidos de diseño E , los cuales se obtienen dividiendo las fuerzas sísmicas F_s por R ($E=F_s/R$). Estas fuerzas sísmicas reducidas son las utilizadas en las combinaciones de carga para el diseño de los elementos [1-2].

Los coeficientes Φ_a y Φ_p son definidos para disminuir el coeficiente de capacidad de disipación de energía en estructuras irregulares que presenten cambios abruptos en rigidez, resistencia o geometría. Lo anterior se incluye debido a que las estructuras regulares tienen un mejor comportamiento ante eventos sísmicos que las estructuras irregulares [1-2].

En la NSR-98 se definen 5 irregularidades en planta ver tabla 2 y 5 irregularidades en altura ver tabla 3.

Tabla 2. Irregularidades en planta NSR-98

Tipo	Irregularidad	ϕ_p
1P	Irregularidad torsional	0.9
2P	Retrocesos excesivos en las esquinas	0.9
3P	Discontinuidades en el diafragma	0.9
4P	Desplazamientos del plano de acción de elementos verticales	0.8
5P	Sistemas no paralelos	0.9

Tabla 3. Irregularidades en altura NSR-98

Tipo	Irregularidad	ϕ_a
1A	Piso flexible (Irregularidad en rigidez)	0.9
2A	Irregularidad en la distribución de masas	0.9
3A	Irregularidad geométrica	0.9
4A	Desplazamientos dentro del plano de acción	0.8
5A	Piso débil - Discontinuidad en la resistencia	0.8

El cambio en la NSR-10 respecto a las irregularidades consiste en la adición de irregularidades tanto en planta como en altura. En planta se agrego la irregularidad torsional extrema 1bP ver tabla 4, y en altura se adicionaron la irregularidad extrema en rigidez 1bA y la discontinuidad extrema en la resistencia 5bA ver tabla 5.

Tabla 4. Irregularidades en planta NSR-10

Tipo	Irregularidad	ϕ_p
1aP	Irregularidad torsional	0.9
1bP	Irregularidad torsional extrema	0.8
2P	Retrocesos excesivos en las esquinas	0.9
3P	Discontinuidades en el diafragma	0.9
4P	Desplazamientos del plano de acción de elementos verticales	0.8
5P	Sistemas no paralelos	0.9

Tabla 5. Irregularidades en altura NSR-10

Tipo	Irregularidad	ϕ_a
1aA	Piso flexible (Irregularidad en rigidez)	0.9
1bA	Piso flexible (Irregularidad extrema en rigidez)	0.8
2A	Irregularidad en la distribución de masas	0.9
3A	Irregularidad geométrica	0.9
4A	Desplazamientos dentro del plano de acción	0.8
5aA	Piso débil - Discontinuidad en la resistencia	0.9
5bA	Piso débil - Discontinuidad extrema en la resistencia	0.8

Para determinar el grado de irregularidad en planta y en altura de una edificación se analizan todos los casos de irregularidades presentados en las tablas 2, 3, 4 y 5 según la norma que se esté utilizando. Para determinar el grado de irregularidad en planta, en el caso que la edificación presente varios tipos de irregularidad, se aplica el menor valor de ϕ_p y del mismo modo se calcula la irregularidad en altura para obtener ϕ_a [1].

En la NSR-10 no solo se analiza el grado de irregularidad en planta y en altura de la edificación. Adicionalmente se incluyó el coeficiente de reducción de la

capacidad de disipación de energía causado por ausencia de redundancia en el sistema de resistencia sísmica Φ_r [1].

Un sistema se considera no redundante si la resistencia ante las fuerzas sísmicas es asignada a muy pocos elementos, por el contrario si el sistema de resistencia sísmica es redundante la resistencia sísmica es compartida entre muchos elementos[9].

Por definición según la NSR-10 un sistema se considera redundante si la falla de cualquier elemento del sistema de resistencia sísmica no resulta en una reducción de más del 33% de la resistencia sísmica del piso ni produce una irregularidad en planta extrema tipo 1bP [9].

Según lo anterior, si el sistema es redundante el valor de Φ_r es igual a 1, es decir no se reduce el valor de R, por el contrario si el sistema no es redundante el valor de Φ_r es igual a 0.75 y en este caso el valor de R disminuye. De esta forma se determina el grado de redundancia o ausencia de ella de la edificación bajo estudio [1].

En la figura 7 se muestran las ecuaciones para determinar el valor de R según las condiciones anteriores tanto para la NSR-98 como para la NSR-10.

NSR-98	NSR-10
$R = \Phi_a \cdot \Phi_p \cdot R_o$	$R = \Phi_a \cdot \Phi_p \cdot \Phi_r \cdot R_o$

Figura 7 Reducción del valor de R para estructuras irregulares NSR-98 y NSR-10

2.1.5.4. COMBINACIONES DE CARGA Y NUEVOS FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA

En el diseño utilizando el método del estado límite de la resistencia, el margen de seguridad se incluye multiplicando las cargas de servicio por factores de carga utilizando las combinaciones requeridas, adicionalmente la resistencia nominal del elemento se modifica multiplicándola por factores de reducción de resistencia. Los factores de carga se definen en la normatividad para tomar en cuenta en el diseño según el tipo de carga, el grado de precisión con el cual se calcula y las variaciones esperadas. Los coeficientes de reducción de resistencia se utilizan para tomar en cuenta la existencia de elementos con baja resistencia debido a variaciones en la resistencia de materiales, dimensiones de los elementos, inexactitudes en las ecuaciones de diseño, incluir el grado de ductilidad, confiabilidad requerida y el nivel de importancia del elemento estructural dentro del sistema de resistencia sísmica [1].

En la NSR-10 las combinaciones de carga para el diseño de estructuras son las mismas para todos los materiales, a diferencia de la NSR-98 en la cual usando el método del estado límite de la resistencia, las combinaciones de carga para estructuras de concreto o mampostería estructural eran diferentes a las usadas para estructuras de acero y estructuras denominadas mixtas [1].

En las figuras 8 y 9 se presentan las combinaciones de carga contenidas en la NSR-98 y NSR-10 respectivamente.

1.40 D + 1.70 L
1.05 D + 1.28 L + 1.28 W
0.90 D + 1.30 W
1.05 D + 1.28 L + 1.00 E
0.90 D + 1.00 E
1.40 D + 1.70 L + 1.70 H
1.05 D + 1.28 L + 1.05 T
1.40 D + 1.40 T

Figura 8 Combinaciones de carga para el método de la resistencia según NSR-98

En la figura 8, D es carga muerta, L cargas vivas, W carga de viento, E fuerzas sísmicas reducidas de diseño, H cargas debidas al empuje lateral del suelo o a presión hidrostática y T fuerzas y efectos causados por expansión o contracción debida a cambios de temperatura, retracción de fraguado, flujo plástico, cambios de humedad, asentamientos diferenciales o combinación de varios de estos efectos [2].

$1.4D$
 $1.2D+ 1.6L + 0.5(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e)$
 $1.2D+ 1.6(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e) + (1.0L \text{ ó } 0.5W)$
 $1.2D+ 1.0W+ 1.0L + 0.5(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e)$
 $1.2D+ 1.0E + 1.0L$
 $0.9D+ 1.0W$
 $0.9D+ 1.0E$

Figura 9 Combinaciones de carga para el método de la resistencia según NSR-10

En la figura 9, D es carga muerta, L cargas vivas, L_r carga viva sobre la cubierta, G carga debida al granizo, L_e representa la carga de empozamiento de agua, W carga de viento y E fuerzas sísmicas reducidas de diseño para el diseño de los elementos estructurales [1].

Las combinaciones de carga de la NSR-10 son menores a las utilizadas en la NSR-98, adicionalmente los valores de los coeficientes de reducción de resistencia son menores a los prescritos en la NSR-98. Estas modificaciones hacen que los valores de las combinaciones de carga concuerden con los factores de reducción de resistencia para una misma probabilidad de falla estructural [1].

La resistencia de diseño de un elemento en términos de flexión, carga axial, cortante o torsión debe ser igual a la resistencia nominal multiplicada por los coeficientes de reducción de resistencia. En la tabla 6 se presentan comparativamente los coeficientes de reducción de resistencia para la NSR-98 y NSR-10 [1].

Tabla 6. Coeficientes de reducción de resistencia NSR-98 y NSR-10

Condición de carga	NSR-98	NSR-10
Secciones controladas por tracción	0.90	0.90
Secciones controladas por compresión	0.75	0.75
Elementos con refuerzo en espiral	0.75	0.75
Elementos reforzados de otra manera	0.70	0.65
Cortante y torsión	0.85	0.75
Aplastamiento en el concreto	0.70	0.65

2.1.5.5. OTROS CAMBIOS

El chequeo de columna fuerte viga débil era exigido para estructuras DES exclusivamente, desde la expedición del código CCCSR-84 y en la NSR-98, ahora en la NSR-10 este requisito también es aplicable a estructuras DMO. El chequeo consiste en la verificación de que la sumatoria de los momentos nominales de flexión de las columnas que llegan a un nudo, excedan en un 20% la sumatoria de los momentos nominales de flexión de las vigas del nudo. Por lo anterior se evita la falla en las columnas debido a que se garantiza que la formación de la rotula plástica se presente en los extremos de las vigas [10].

En cuanto al diseño de columnas se reduce la cuantía máxima del 6% al 4% del área bruta del elemento, para evitar excesivo refuerzo longitudinal. Como consecuencia de este cambio, se puede dar el caso en el que se requerirá ampliar la sección para cumplir con este requisito en elementos que exijan cuantías altas por resistencia [10].

En la NSR-10, capítulo C.10 Flexión y cargas axiales incluye una de las modificaciones más importantes, la cual es el uso de la teoría unificada para determinar el comportamiento de los elementos a flexión usando la deformación unitaria en el acero de refuerzo en la zona de tracción del elemento, a diferencia de la NSR-98 en la cual se utilizaba el concepto de cuantía balanceada [1].

2.2. MARCO TEÓRICO

El estudio *Apreciaciones sobre el diseño sismo-resistente en Colombia y sus aplicaciones*, analizó diferentes aspectos relacionados con el diseño estructural de edificaciones luego de la expedición de CCCSR-84. Los parámetros estudiados fueron el impacto de la zonificación, la altura de la edificación y la relación entre el tamaño y las luces de las vigas. Adicionalmente se analizó la variación en costos entre sistemas estructurales de resistencia sísmica[6].

La metodología adoptada consistió en: definir inicialmente una planta general de la edificación y una serie de alternativas de dimensiones de los elementos estructurales. Posteriormente realizar el estudio de estas soluciones teniendo en cuenta el cumplimiento de los requisitos existentes y propuestos. Luego evaluar el costo de las soluciones planteadas en el punto anterior y finalmente analizar la relación entre las variaciones del costo y los parámetros de diseño relevantes[6].

En la primera parte del estudio se realizó el diseño de 24 edificios de apartamentos de 2, 5, 8 y 12 pisos de altura, localizados en diferentes regiones del país, en zonas de riesgo sísmico alto, intermedio y bajo. La principal conclusión determinó que la mayor variación de los costos de la estructura fue causada por el aumento del costo de las columnas. Este aumento está directamente relacionado con los requisitos de control de deriva del código y no con el diseño por resistencia, a medida que se aumenta la altura de la edificación. La incidencia del costo de las columnas en la edificación tiende a aumentar en la medida en que se incrementan las solicitaciones sísmicas dependiendo de la zona de riesgo que se analice[6].

En la segunda parte del estudio fueron analizados edificios aporricados de 5, 8 12 y 15 pisos. Se escogieron ciudades localizadas en tres zonas de amenaza sísmica, Cali, Bogotá y Barranquilla, las cuales representan zonas de riesgo sísmico alto, intermedio y bajo respectivamente. Las variables estudiadas fueron la

altura del edificio, zona de riesgo sísmico y modulación en la relación de las luces de las vigas[6].

Las principales conclusiones de la segunda parte de este estudio fueron que las edificaciones localizadas en regiones en donde el riesgo sísmico es alto, demandan mayores cantidades de obra que las localizadas en regiones de menor riesgo sísmico. Sólo en edificaciones localizadas en riesgo sísmico bajo las dimensiones de las columnas están regidas por la resistencia y no por las derivas, en regiones de amenaza intermedia y alta este parámetro lo rige el control de la deriva. El aumento en las cantidades de refuerzo y concreto es directamente proporcional al aumento de las luces de las vigas. A medida que aumenta el número de pisos aumenta la cantidad de refuerzo y concreto sin embargo la cantidad de acero aumenta de forma más pronunciada que la cantidad de concreto. A mayores luces de vigas mayor cantidad de refuerzo necesario en las columnas[6].

En la tercera parte del estudio se compararon cantidades de obra para diferentes sistemas estructurales con las mismas condiciones sísmicas para determinar cuál es la variación entre un sistema y otro en los costos directos. Los sistemas estructurales estudiados fueron pórticos de concreto, pórticos y muros de concreto, Dual con muros de concreto, Dual con muros de mampostería, mampostería reforzada y mampostería confinada. La principal conclusión fue determinar que la diferencia entre un sistema y otro variaba entre el 2% y 5% de los costos directos totales del proyecto.

A continuación se mencionan algunos de los estudios previos que sirvieron como base para el trabajo de investigación relacionado anteriormente:

- Eficiencia de los Sistemas Aporticados dentro del CCCSR-84 [11].
- Impacto de la Zonificación y Requisitos Sísmicos del Decreto 1400/84 en el Costo de Estructuras de Edificios Aporticados en el País[12].

- Aumento en Costos de un Edificio Diseñado según Normas Sismo Resistentes al aumentar su Número de Pisos [13].
- Incidencias de las Cargas Sísmicas en el Costo de la Estructura para las diferentes Zonas Sísmicas[14].

En el Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica 2011 fue presentado el estudio “Impacto Económico de la NSR-10 en el Sistema Sismo Resistente de edificaciones DMO de Concreto Reforzado”. En esta investigación se analizó el efecto del cambio del espectro de aceleraciones en el costo del sistema de resistencia sísmica para edificios aporticados de cinco pisos. Se realizó el diseño estructural preliminar de 45 modelos estructurales. Todos los modelos analizados tienen la misma geometría y cargas verticales excepto el peso propio de los elementos. Se dividió el número de edificios en tres grupos los cuales tienen diferentes secciones de columnas y vigas y un perfil de suelo determinado. El estudio concluye que para los modelos estudiados no se encontraron diferencias significativas entre las derivas y los índices de costo específicamente en el análisis del perfil de suelo S-2 asociado a la NSR-98 y su perfil de suelo correspondiente en la NSR-10 suelo Tipo C[10].

Las derivas del diseño de los edificios según la NSR-10 suelo D aumentó hasta en un 20% con respecto al diseño según la NSR-98 suelo S-2, sin embargo el aumento en el costo del concreto y del acero de refuerzo de vigas y columnas solo fue del 7%. En el análisis del suelo tipo D con respecto al tipo C las derivas aumentaron hasta en un 25% con un aumento del costo de vigas y columnas del 9%. Este estudio solo tomó en cuenta el efecto del cambio del espectro de aceleraciones[10].

3. MATERIALES Y/O MÉTODOS

3.1. Definición de los proyectos a evaluar

Se escogieron tres edificaciones planteadas para la ciudad de Bogotá las cuales contaban con diseño arquitectónico y estudio de suelos. Los proyectos escogidos fueron planteados para tres zonas diferentes de la Microzonificación Sísmica de Bogotá de Agosto del año 1997 o en las zonas de transición. Adicionalmente los proyectos escogidos cumplieron con la sección A.3.4.2 – Método de análisis a utilizar [2] .

3.2. Análisis comparativo NSR-98 y NSR-10

Inicialmente se determinó el impacto del cambio de cuatro parámetros de diseño relevantes identificados en la actualización de la normatividad sísmica. Contemplan modificaciones relacionadas con el análisis y diseño de las estructuras y son aplicables a estructuras de concreto reforzado con sistema de resistencia sísmica combinado.

Los parámetros analizados son los siguientes:

- Microzonificación Sísmica de Bogotá
- Modulo de elasticidad
- Irregularidades y ausencia de redundancia
- Combinaciones de carga y coeficientes de reducción de resistencia.

Las modificaciones en las irregularidades y la ausencia de redundancia fueron analizadas conjuntamente debido a que estos parámetros inciden simultáneamente en el coeficiente de capacidad de disipación de energía. Del mismo modo fue analizado el impacto del cambio en las combinaciones de carga y los coeficientes de reducción de resistencia, debido a que es inseguro utilizar las

nuevas combinaciones de carga prescritas en la NSR-10 con los factores de reducción de resistencia de la NSR-98 [1].

El primer parámetro analizado fue el cambio en la Microzonificación sísmica de Bogotá, el cual determina modificación en los movimientos sísmicos para el análisis de la estructura.

A partir del estudio de suelos de cada proyecto fue determinada la zona de respuesta sísmica utilizando el mapa definido por la Microzonificación Sísmica de Agosto de 1997, asociada a la NSR-98. Tomando como base la localización de los proyectos y utilizando el mapa de la Microzonificación Sísmica de Bogotá adoptado mediante el decreto 523 de 2010 fue determinada la zona de respuesta sísmica del proyecto asociada a la NSR-10.

Para determinar el impacto del cambio en los parámetros que se analizaron se determinaron las cantidades de obra del resultado del análisis y diseño de los proyectos cambiando individualmente cada uno de las modificaciones mencionadas, para esto se siguió el procedimiento que se describe a continuación.

Se realizó el análisis y diseño del modelo estructural de cada proyecto teniendo en cuenta los parámetros de diseño descritos en la NSR-98. Posteriormente fue analizado y diseñado el proyecto cambiando individualmente los factores indicados utilizando el modelo estructural y las disposiciones de la NSR-98. Después de realizar el análisis y diseño de los proyectos cambiando cada uno de los factores fueron determinadas las cantidades de obra para los proyectos.

Las cantidades de acero de refuerzo y concreto fueron determinadas para los elementos que conforman el sistema de resistencia sísmica de la estructura: vigas aéreas, columnas y pantallas.

Para el análisis, diseño y resultados de cantidades de acero de refuerzo y concreto se utilizó el software para análisis y diseño de edificios de concreto,

EngSolutions RCB v8.0. Las cantidades determinadas por medio del software no son detalladas, a continuación se describen algunas consideraciones del cálculo de cantidad de acero y concreto para los elementos que conforman el sistema de resistencia sísmica.

El cálculo del volumen de concreto para vigas se determina a partir de la sección transversal del elemento y la longitud total de nudo a nudo, por lo cual en las intersecciones el cálculo no es real. En cuanto a las cantidades de acero, el peso del refuerzo longitudinal es teórico, se calcula a partir de la cuantía en 11 puntos a lo largo del elemento. Adicionalmente la conversión a varillas reales, la longitud de traslapes y ganchos hace que el peso real del refuerzo sea mayor [15].

En cuanto a las columnas el cálculo de volúmenes de concreto a partir de la sección de la columna y la luz libre. El cálculo de las cantidades de acero de estribos incluye barras reales y las cantidades de ramas adicionales y ganchos requeridos en el diseño. El peso del refuerzo longitudinal es teórico y se basa en la cuantía de diseño del elemento[15].

Las cantidades de volúmenes de concreto para pantallas son calculados a partir de la sección transversal del elemento incluyendo el tamaño de los elementos de borde. El refuerzo horizontal se calcula teniendo en cuenta varillas reales, sin embargo no incluye los ganchos. En cuanto al refuerzo vertical se determina teniendo en cuenta la cuantía de acero, aunque no tiene en cuenta varillas reales[15].

Para determinar las cantidades de obra de este capítulo fueron utilizados los factores que se consolidan en la tabla 7. Estos factores son propuestos por el manual del software EngSolutions RCB V.8.0 para determinar el costo de la estructura.

Consideran desperdicios del 10% para el cálculo total del volumen de concreto de la estructura en vigas, columnas y pantallas a diferencia del refuerzo en el cual se considera un 5% de desperdicios.

En vigas se considera un aumento del 15% para tener en cuenta los ganchos y traslajos del refuerzo longitudinal, por otro lado en columnas y pantallas se considera un aumento del 5% para considerar el mismo criterio.

Para vigas y columnas se aumenta en 1.05 veces el peso de los estribos, por otro lado el factor para pantallas es de 1.10.

Tabla 7. Factores cantidades de acero y concreto

Elemento	Concreto		Acero Refuerzo	
	Desperdicios	Ganchos, traslajos y desperdicios	Estribos	
Vigas	1.10	1.20	1.05	
Columnas	1.10	1.10	1.05	
Pantallas	1.10	1.10	1.10	

En la figura 10 se presenta el diagrama de flujo del método aplicado para determinar el impacto del cambio de los parámetros de diseño analizándolos individualmente a partir de las cantidades de concreto y acero de refuerzo obtenidas.

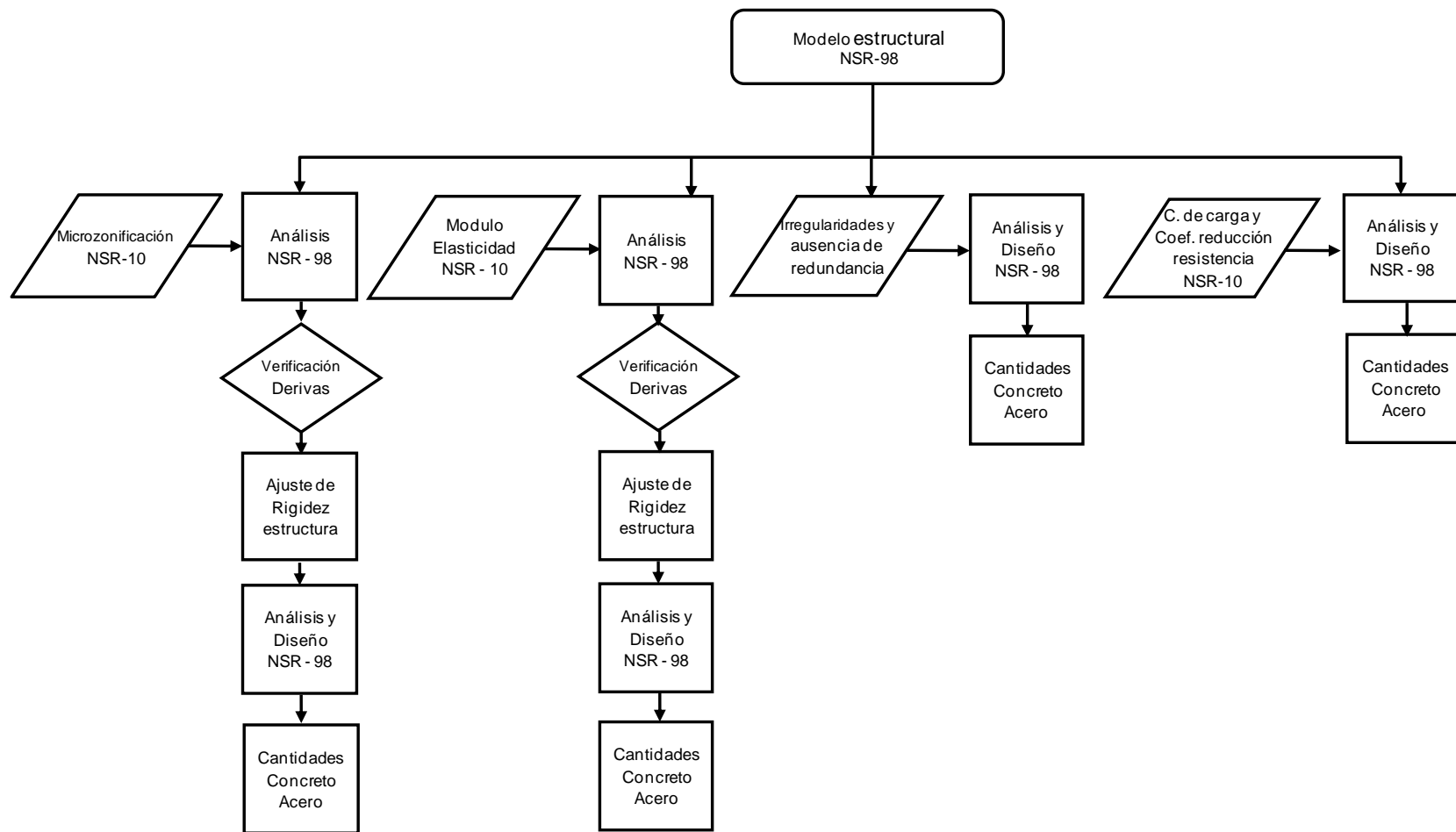


Figura 10 Método para determinar el impacto del cambio de los parámetros de diseño analizándolos individualmente

3.3. Análisis y diseño estructural según las NSR-98 y NSR-10

El análisis y diseño estructural de las edificaciones se realizó utilizando el software EngSolutions RCB V.8.0. Los procedimientos de diseño sismo resistente de una edificación nueva se describen en la sección A.1.3-4 de la NSR-10. Sin embargo estos pasos conceptualmente son similares a los pasos de diseño siguiendo los lineamientos de la NSR-98.

En consecuencia, se desarrolló el diagrama de flujo de la figura 11 con los pasos que se siguieron para el análisis y diseño de los elementos de resistencia sísmica de las edificaciones estudiadas. El diagrama de flujo se utilizó para el diseño con la NSR-98 y la NSR-10. Los factores de análisis y diseño modificados en las normas se aplicaron en cada caso.

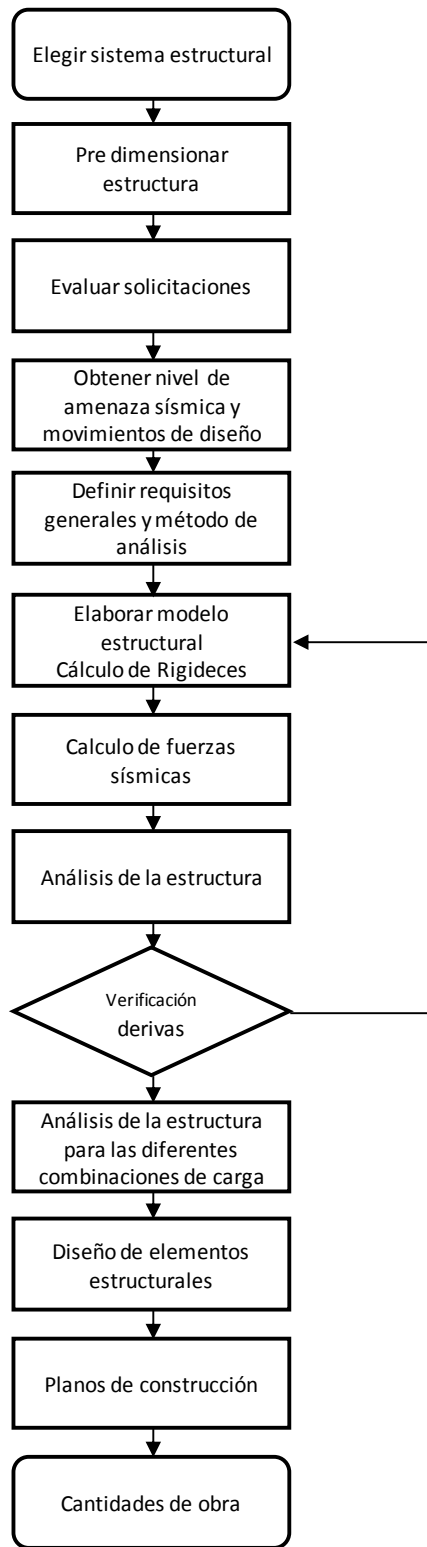


Figura 11 Diagrama de flujo del diseño sismo resistente de un edificio

Inicialmente en el diseño sismo resistente de un edificio se elige el sistema estructural. No obstante, para el desarrollo de este trabajo se definió el mismo sistema estructural para las edificaciones.

Luego se pre-dimensionó la estructura. Esta actividad incluyó previamente la definición de bordes de placa, identificación de vacíos, ductos y ejes. Se determinó el sistema de entrepiso el cual para todos los proyectos es aligerado. Posteriormente se localizaron las columnas y pantallas según la arquitectura desarrollada para el proyecto, y finalmente en esta etapa se pre dimensionaron los elementos estructurales.

En seguida se evaluaron las solicitaciones de la estructura y se realizó un análisis de las cargas muertas y cargas vivas.

El siguiente paso consistió en obtener el nivel de amenaza sísmica, teniendo en cuenta que el desarrollo de este trabajo es el estudio de edificaciones planteadas para la ciudad de Bogotá. Por tal motivo los parámetros sísmicos para determinar los movimientos de diseño de las edificaciones, se obtuvieron a partir de la Microzonificación sísmica de Bogotá.

Posteriormente fueron definidos los requisitos generales de diseño, entre los cuales se determinó el grado de irregularidad de la edificación y el coeficiente de capacidad de disipación de energía. El método de análisis de las edificaciones para este estudio había sido definido previamente y es el método de la fuerza horizontal equivalente.

Después se realizaron los modelos estructurales de las edificaciones a analizar siguiendo los lineamientos de la NSR-98 y la NSR-10. El modelo matemático de las estructuras se realizó utilizando el software EngSolutions RCB V.8.0.

Mediante el software se obtuvieron las fuerzas sísmicas y posteriormente se analizó el modelo con estas solicitaciones. A continuación se verificaron las derivas del modelo estructural. Si no cumplían con los requisitos de estos parámetros en la NSR-98 y NSR-10, era necesario modificar la rigidez del edificio cambiando las secciones de los elementos del sistema de resistencia sísmica y repetir el proceso hasta que la verificación de las derivas cumpliera.

En el momento en el cual los requisitos de derivas de las edificaciones cumplían, se realizó el siguiente paso que consiste en el análisis de la estructura para las diferentes combinaciones de carga prescritas en la NSR-98 y NSR-10 en el análisis de cada caso. En seguida se realizó el diseño de los elementos del sistema de resistencia sísmica.

Posteriormente se realizaron los despieces de los elementos estructurales utilizando el software DC CAD de Diseño de Soluciones. Para los despieces se ajustó la geometría de los elementos con los planos estructurales. Posteriormente se generó el refuerzo horizontal teniendo en cuenta longitudes y diámetros de barras comerciales, así mismo se generaron los estribos. Los despieces se configuraron teniendo en cuenta los ganchos y longitudes de desarrollo necesarias.

Después se determinaron las cantidades de concreto y acero de los elementos del sistema de resistencia sísmica. Las cantidades de concreto se determinaron a partir de los despieces y las cantidades de acero de refuerzo se establecieron utilizando el software DL NET de Diseño de Soluciones.

La cimentación de los proyectos se realizó según lo establecido en el estudio de suelos para cada uno. Los modelos se ejecutaron utilizando el software EngSolutions RCB. Inicialmente se pre-dimensionaron las vigas con dimensiones surgidas de apreciaciones básicas del planteamiento arquitectónico, los requisitos establecidos en las recomendaciones de los estudios de suelos y la formulación de dimensiones mínimas establecidas en la Norma, en los cuales el diseñador

aplica su criterio y experiencia. Se configuró el modelo estructural y se cargó con las reacciones de la superestructura de los edificios. Posteriormente se realizó el análisis de la estructura y se diseñaron las vigas de las placas de cimentación. Este proceso se realizó inicialmente con los requerimientos de la NSR-98 y luego con la NSR-10. A continuación se determinaron las cantidades de concreto y acero de las vigas. Las cantidades de concreto se determinaron a partir de los despieces y las cantidades de acero de refuerzo se establecieron utilizando el software DL NET de Diseño de Soluciones.

El presupuesto de los proyectos se dividió en capítulos, subcapítulos y actividades. Para realizar la evaluación económica se utilizaron precios de lista de materiales y costos típicos de equipo y mano de obra para el año 2011.

4. RESULTADOS

4.1. Características de los proyectos evaluados

En la tabla 8 se describen características generales de los proyectos analizados. El número de pisos descrito no incluye la cimentación. Las características de la cimentación se muestran en la tabla 8. Para el proyecto 1 y 2 la placa de cimentación toma el 60% de la carga y los pilotes el 40%.

Tabla 8. Características de los proyectos

Proyecto	No pisos	Cimentación
1	5	Placa - pilote (60%-40%)
2	6	Placa - pilote (60%-40%)
3	7	Placa flotante

Los modelos estructurales están analizados desde el nivel en el cual se empotraron, es decir, a partir de lo que se considera vibración de la estructura.

El sistema estructural definido para los proyectos es combinado y el grado de disipación de energía es moderado DMO

La distribución arquitectónica de cada proyecto para los pisos tipo se presenta en la Figuras 12, 13 y 14.

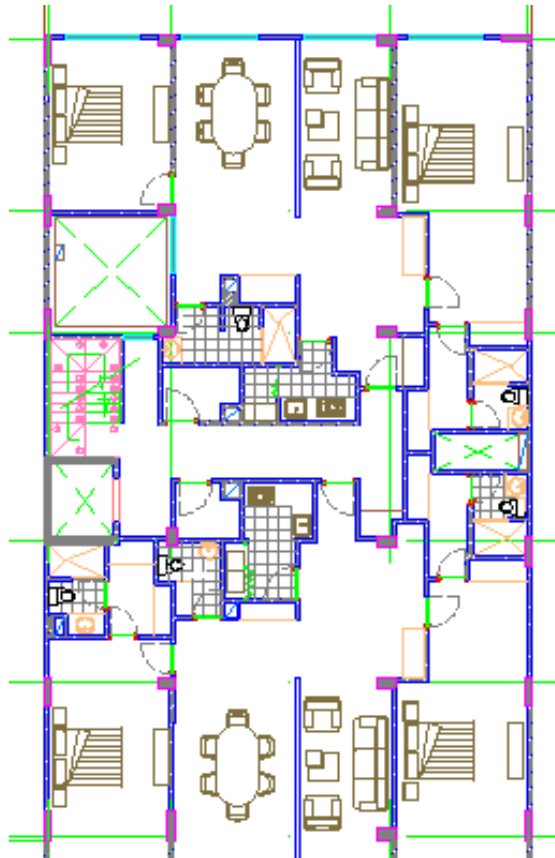


Figura 12 Proyecto 1 planta arquitectónica

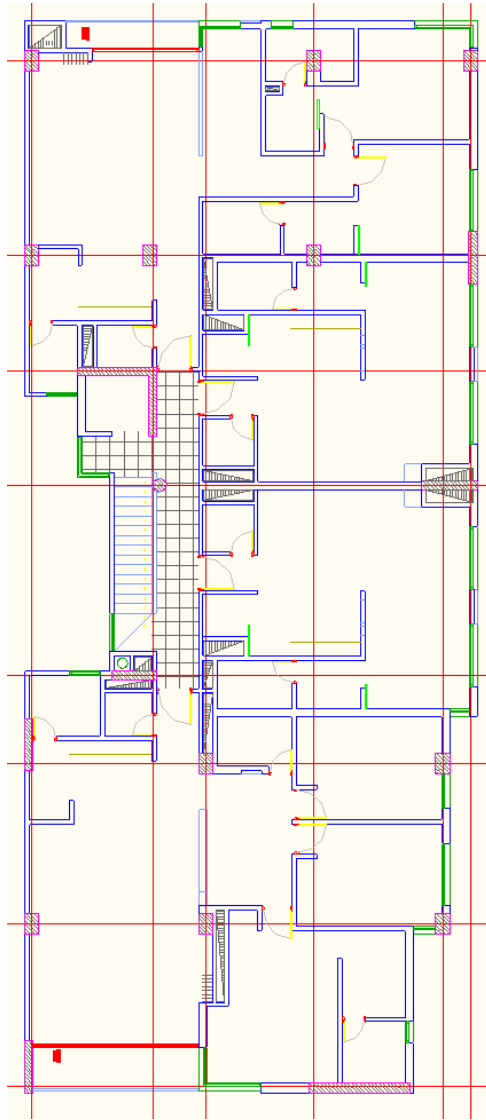


Figura 13 Proyecto 2 planta arquitectónica

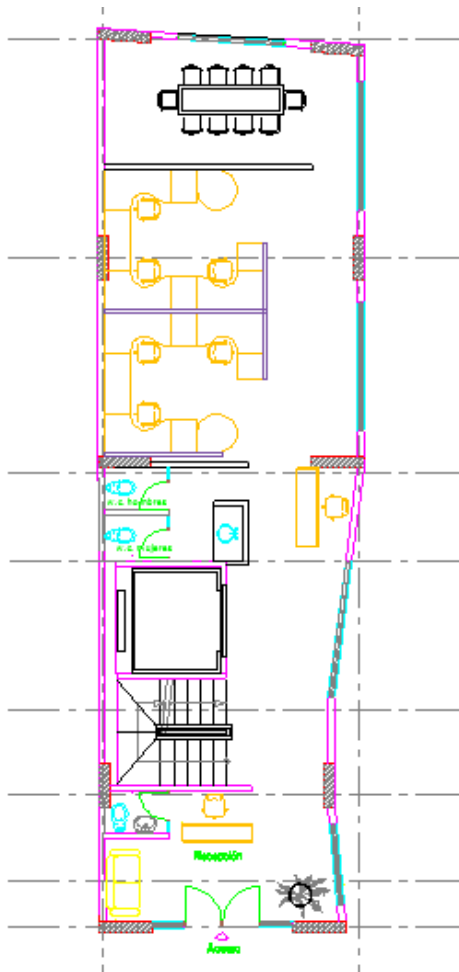


Figura 14 Proyecto 3 planta arquitectónica

En la Figuras 15, 16 y 17, se muestra la configuración de los proyectos estructurales.

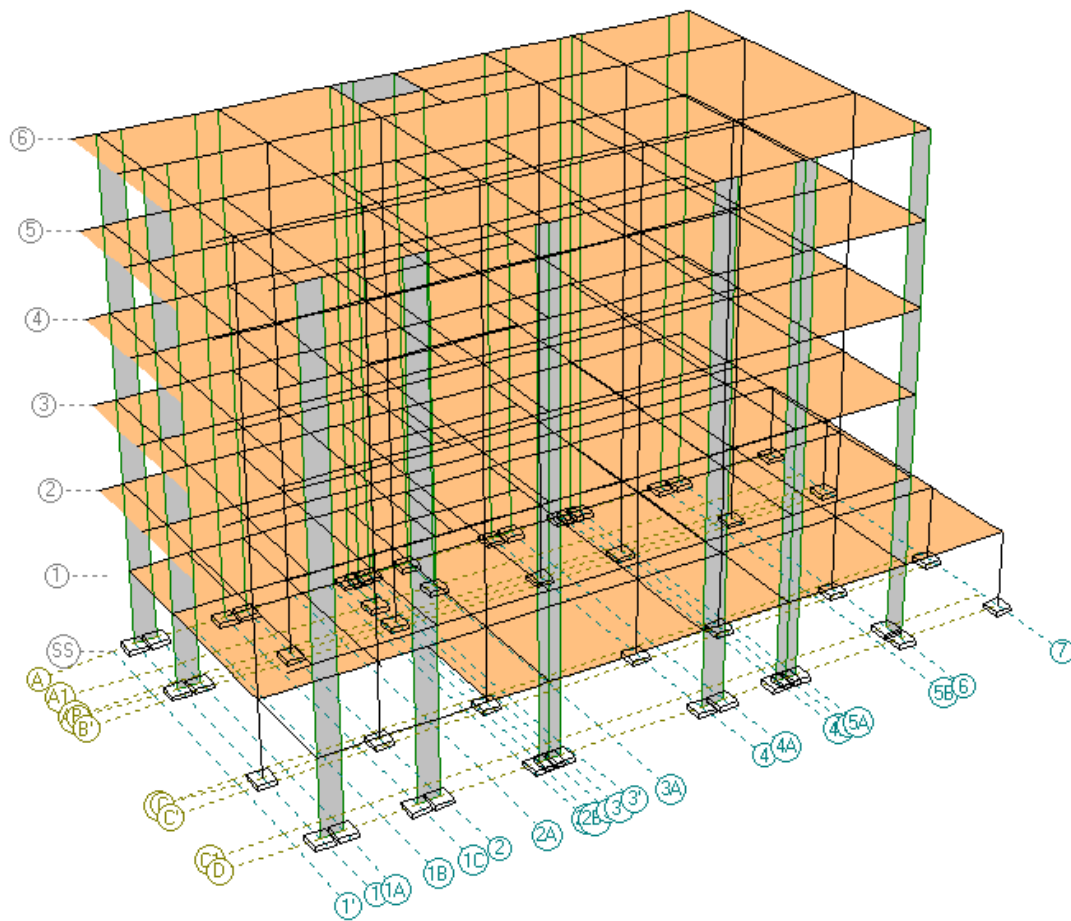


Figura 15 Proyecto 1 configuración del modelo estructural

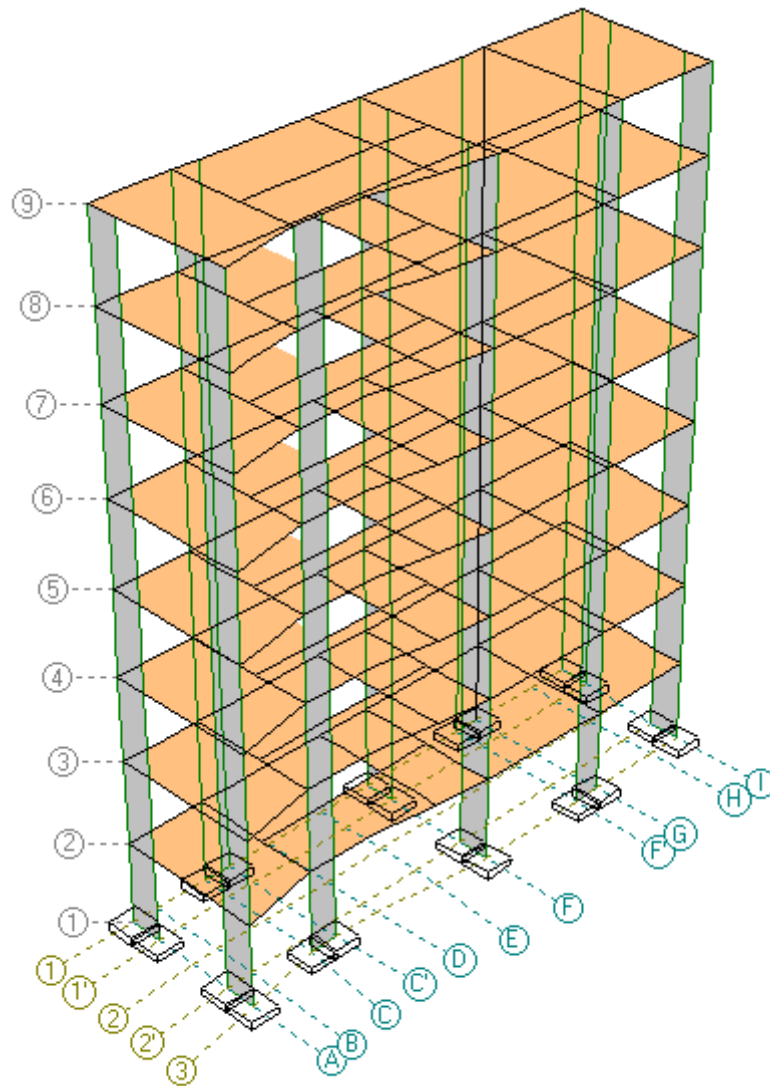


Figura 17 Proyecto 2 configuración del modelo estructural

La tabla 9 describe la zona de la Microzonificación Sísmica de Bogotá asociada a la NSR-98 para cada proyecto. El proyecto 1 está localizado en la Zona 2 – Piedemonte, el proyecto 2 se encuentra en la zona de transición entre Zona 3 – Lacustre A y Zona 4 – Lacustre B y el proyecto 3 está en la Zona 5 – Terrazas y conos.

Tabla 9. Proyectos, Zona de la Microzonificación Sísmica de Bogotá

Proyecto	Zona Microzonificación NSR-98
1	Zona 2
2	Transición Zona 3 y Zona 4
3	Zona 5

Los proyectos fueron escogidos según la Microzonificación Sísmica de Bogotá 1997. En la figura 18 se presentan los espectros de diseño.

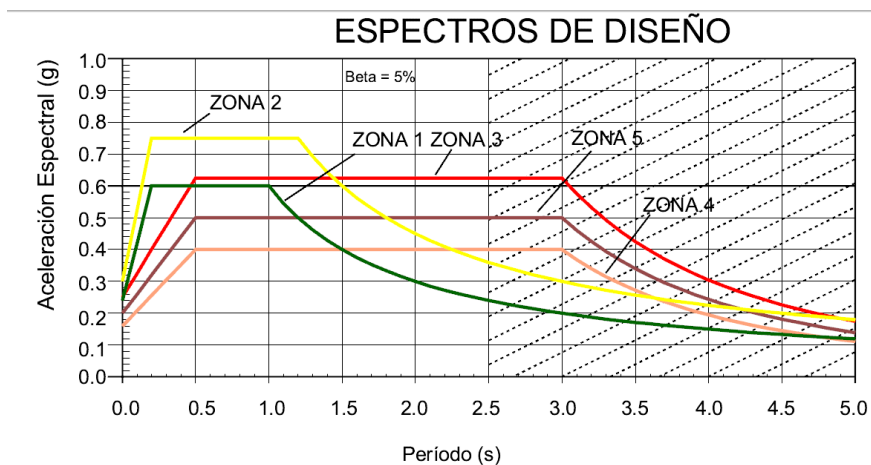


Figura 18 Espectro de diseño Microzonificación Sísmica de Bogotá 1997

Fuente: Microzonificación Sísmica de Bogotá 1997

La equivalencia entre las zonas de la Microzonificación Sísmica de Bogotá de la NSR-98 y la NSR-10 se realizó a partir de la localización de los proyectos en el Mapa de Microzonificación asociado a la NSR-10. En la tabla 10 se presenta la equivalencia entre las zonas.

Tabla 10. Equivalencia zonas de los proyectos según la NSR-98 y NSR-10

Proyecto	NSR-98	NSR-10
1	Zona 2	Transición Lacustre 200 y Piedemonte A
2	Transición Zona 3 y Zona 4	Lacustre 200
3	Zona 5	Aluvial 200

En la figuras 19, 20 y 21 se presentan comparativamente los espectros de aceleraciones de diseño como fracción de la gravedad, para los proyectos analizados según la Microzonificación Sísmica de Bogotá asociada a la NSR-98 y NSR-10.

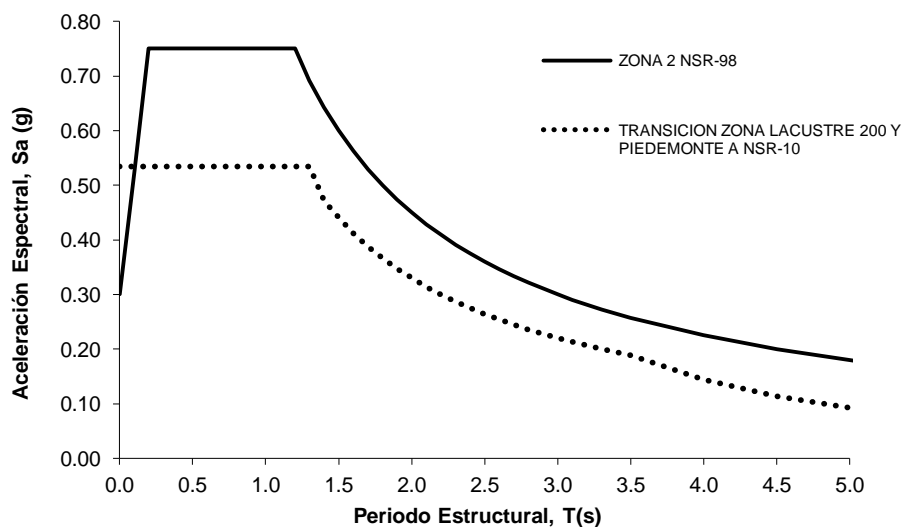


Figura 19 Comparación espectro de aceleraciones Proyecto 1 Microzonificación Sísmica de Bogotá

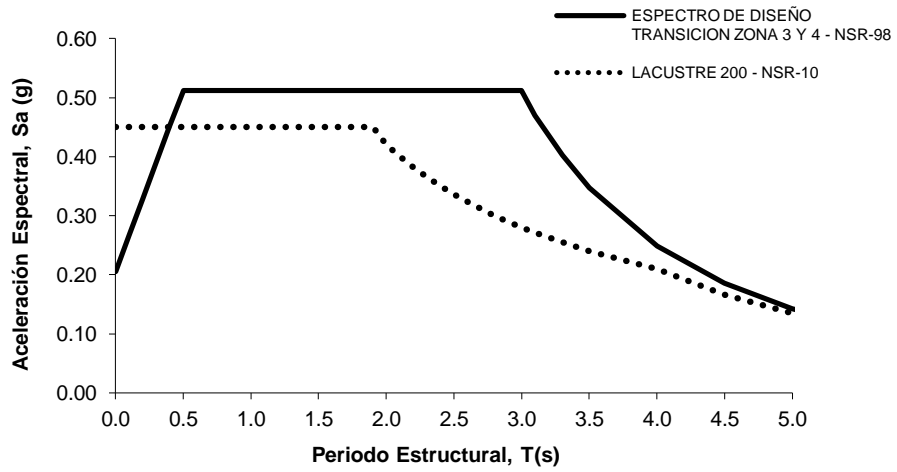


Figura 20 Comparación espectro de aceleraciones Proyecto 2 Microzonificación Sísmica de Bogotá

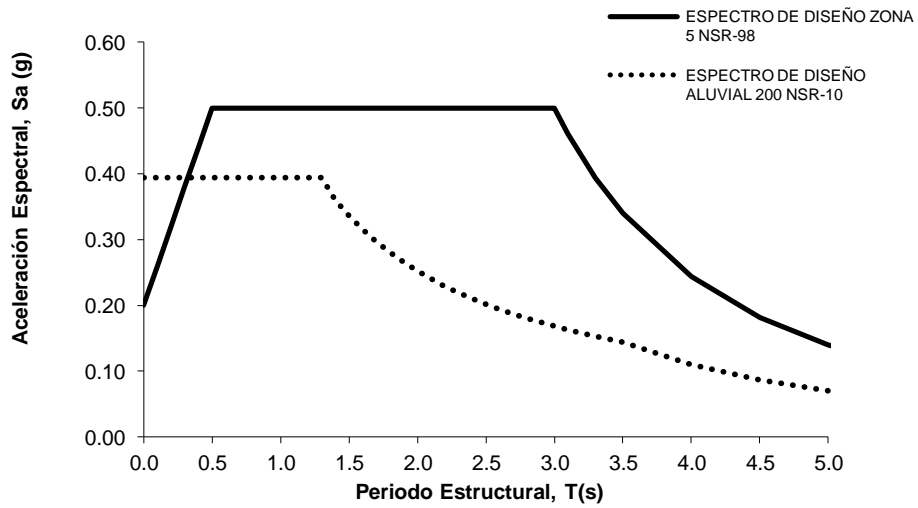


Figura 21 Comparación espectro de aceleraciones Proyecto 3 Microzonificación Sísmica de Bogotá

4.2. Resultados del análisis y diseño estructural de los proyectos considerando individualmente parámetros de diseño

4.2.1. Cambio Microzonificación Sísmica de Bogotá

La figura 22 presenta la variación de la aceleración espectral de diseño de la Microzonificación Sísmica de Bogotá determinada a partir de los periodos de la tabla 11 de las estructuras analizadas bajo los parámetros de la NSR-98 y NSR-10.

Tabla 11. Periodos de la estructuras según NSR-98 y NSR-10

Proyecto	T (s)	
	NSR-98	NSR-10
1	0.39	0.38
2	0.47	0.46
3	0.51	0.50

En el proyecto 1 la disminución del valor S_a de la Microzonificación asociada a NSR-10 con respecto a NSR-98 es de 29%, en el proyecto 2 es del 12% y el proyecto 3 del 20%. Lo anterior se determinó para la meseta del espectro elástico de aceleraciones de diseño, ya que para los tres proyectos el periodo de la edificación corresponde a esta zona del espectro.

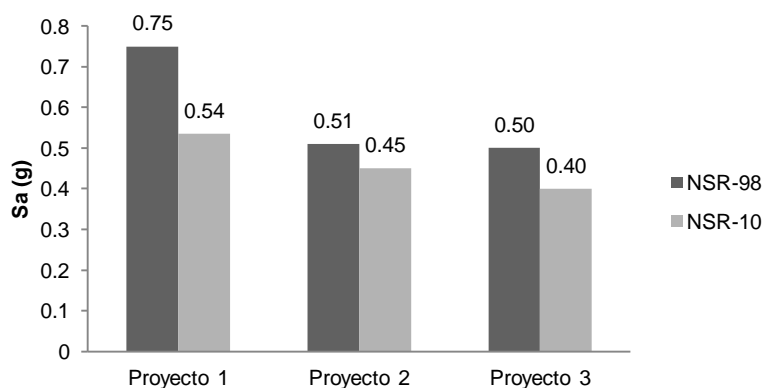


Figura 22 Variación aceleración espectral para los proyectos

Las tablas 12 y 13 muestran los datos de Sa, peso del edificio W, cortante de diseño V y las derivas obtenidas del análisis de la estructura con los requerimientos de la NSR-98 y NSR-10. En la tabla 12 se presentan los datos cambiando la microzonificación asociada a la NSR-10.

Tabla 12. Datos del análisis con la NSR-98

Proyecto	NSR-98				
	Sa	W Edificio	V Edificio	Derivas	
				X	Y
	(g)	(Ton)	(Ton)		
1	0.75	1333	999	1.00%	0.97%
2	0.51	2290	1159	0.99%	0.96%
3	0.50	824	412	1.00%	0.99%

Tabla 13. Datos del análisis cambiando el parámetro Microzonificación de Bogotá

Proyecto	Microzonificación NSR-10				
	Sa	W Edificio	V Edificio	Derivas %	
				X	Y
	(g)	(Ton)	(Ton)		
1	0.54	1220	653	0.99%	0.97%
2	0.45	2164	965	0.99%	0.96%
3	0.40	780	312	0.98%	0.99%

A partir de los datos de las tablas 12 y 13 se realizó un análisis de la disminución del valor de Sa teórico a partir del valor del espectro de aceleraciones para la NSR-98 y la NSR-10, ver figura 22. Debido a la variación del Sa se disminuyeron las secciones de elementos vigas, pantallas y columnas para ajustar las derivas al requisito de norma. Por lo anterior se generó una disminución del peso del edificio. Los resultados de la acción combinada de la variación de Sa y W se presentan en la tabla 14. La variación de la rigidez se determinó a partir de los datos de las figuras 23 y 24. Los datos de la variación máxima de rigidez coinciden con la

diminución del cortante en alguna de las dos direcciones x y y de análisis de la estructura. Lo anterior concuerda con los valores de deriva a los cuales se ajusta la estructura en el proceso de análisis.

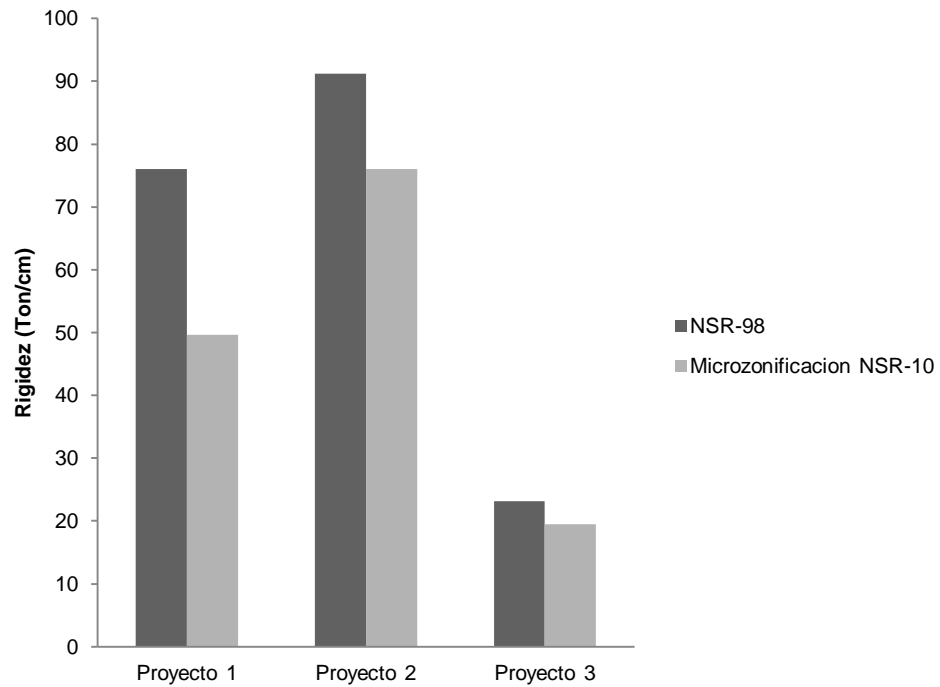


Figura 23 Resultados rigidez sentido X

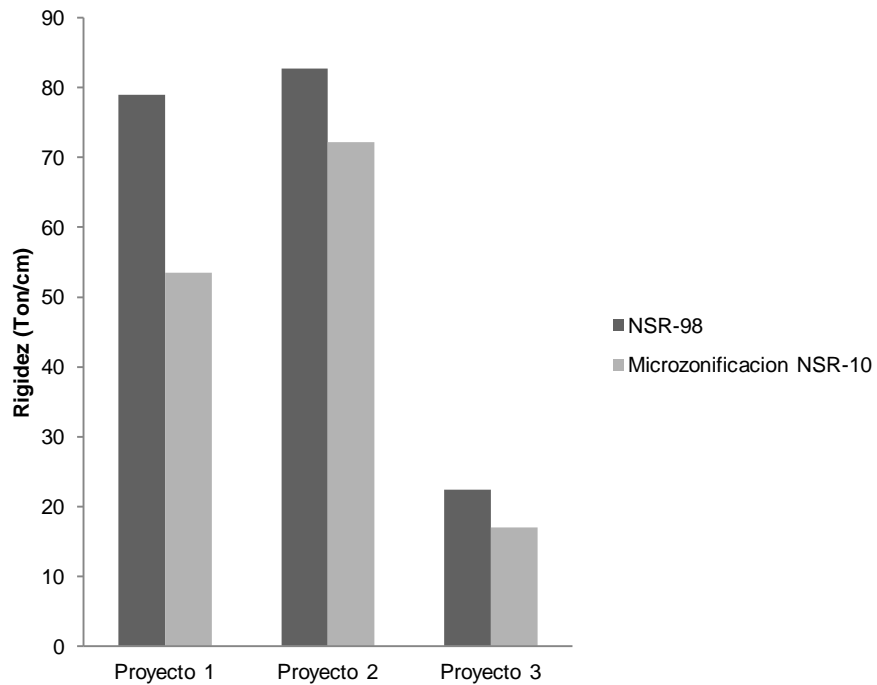


Figura 24 Resultados rigidez sentido Y

Tabla 14. Variaciones cambio Microzonificación Sísmica de Bogotá

Proyecto	Disminución Sa	Disminución W	Disminución V	Variación Rigidez	
				X	Y
1	29%	8%	35%	35%	32%
2	12%	5%	17%	17%	13%
3	20%	5%	24%	16%	24%

4.2.2. Cambio modulo de elasticidad

El modulo de elasticidad calculado con la NSR-10 aumentó en 20.5% con respecto al valor calculado con la NSR-98.

4.2.3. Cambio irregularidades y ausencia de redundancia

En las tablas 15 y 16 se muestra los coeficientes de reducción de la capacidad de disipación de energía causados por irregularidades en altura ϕ_a , en planta ϕ_p y ausencia de redundancia ϕ_r de los proyectos diseñados con las disposiciones de la NSR-98 y NSR-10. Adicionalmente se presenta el coeficiente de capacidad de disipación de energía básico definido para cada sistema estructural y cada grado de disipación de energía del material estructural y el coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño.

Tabla 15. Coeficiente de capacidad de disipación de energía e irregularidades

Proyecto	NSR-98			
	R _o	ϕ_a	ϕ_p	R
1	5.00	1.00	1.00	5.00
2	5.00	1.00	1.00	5.00
3	5.00	1.00	1.00	5.00

Tabla 16. Coeficiente de capacidad de disipación de energía, irregularidades y ausencia de redundancia

Proyecto	NSR-10				
	R _o	ϕ_a	ϕ_p	ϕ_r	R
1	5.00	1.00	1.00	0.75	3.75
2	5.00	1.00	0.90	0.75	3.38
3	5.00	1.00	1.00	0.75	3.75

La figura 25 presenta la variación del coeficiente de disipación de energía para los proyectos diseñados con la NSR-98 y NSR-10. En los tres proyectos existió una disminución del R, lo cual produce un aumento en la fuerza sísmica de diseño que para los proyectos 1 y 3 fue de 33% y el proyecto 2, 48% ver tabla 17.

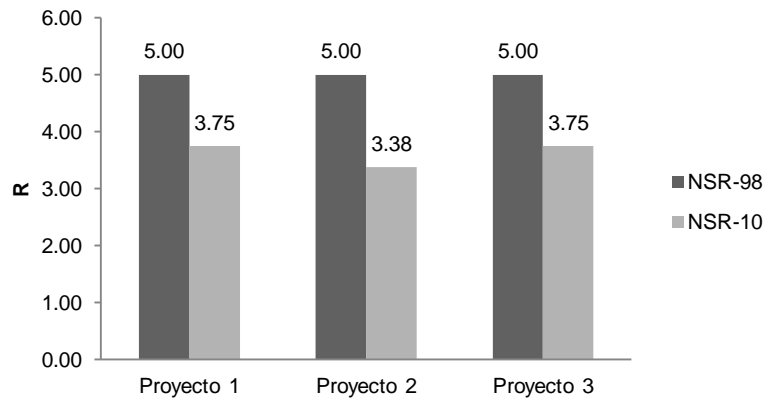


Figura 25 Variación del coeficiente de capacidad de disipación de energía

Tabla 17. Variaciones cambio irregularidades y ausencia de redundancia

Proyecto	R	R	% Aumento
	NSR-98	NSR-10	fuerza sísmica
1	5.00	3.75	33%
2	5.00	3.38	48%
3	5.00	3.75	33%

4.2.4. Cantidades de acero y concreto considerando individualmente parámetros de diseño

En la figuras 26 y 27 se presentan los resultados de índices de cantidades de acero de refuerzo y concreto respectivamente, analizando individualmente los parámetros estudiados en las edificaciones. Los índices se determinaron a partir de las cantidades de acero y de concreto relacionadas con el área de los proyectos.

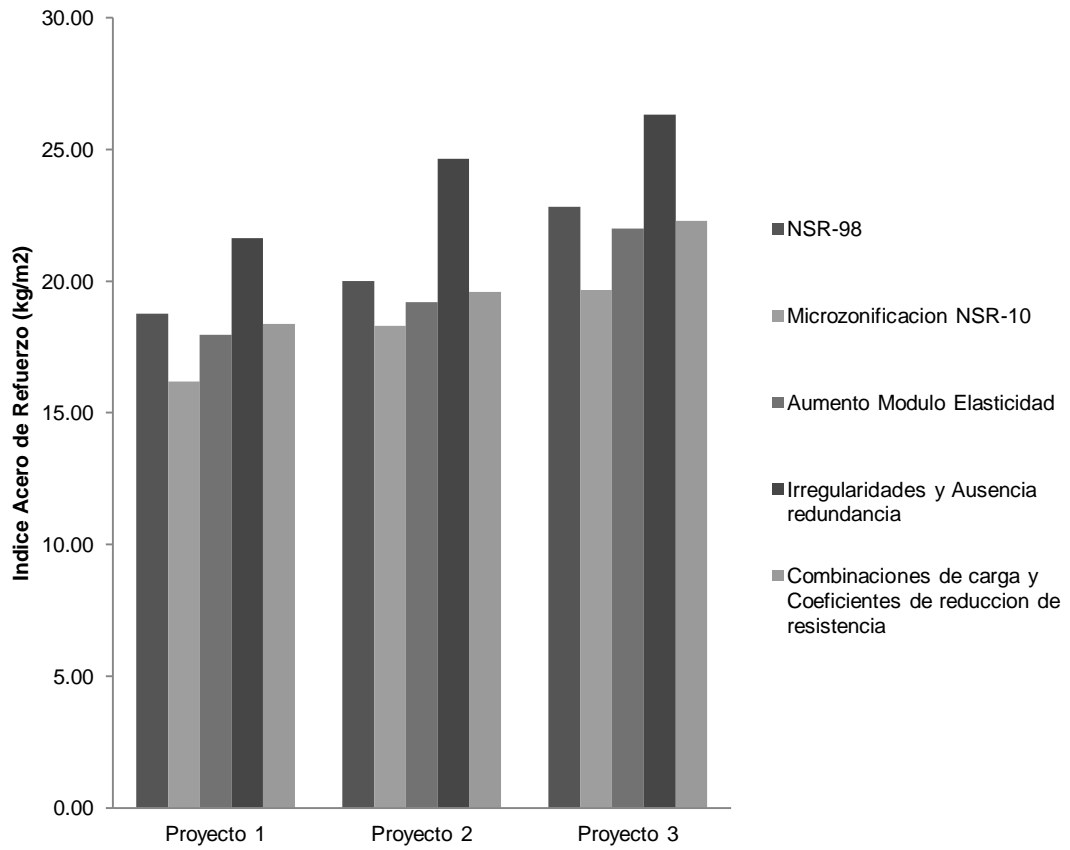


Figura 26 Comparación cantidades de acero de refuerzo analizando parámetros individuales

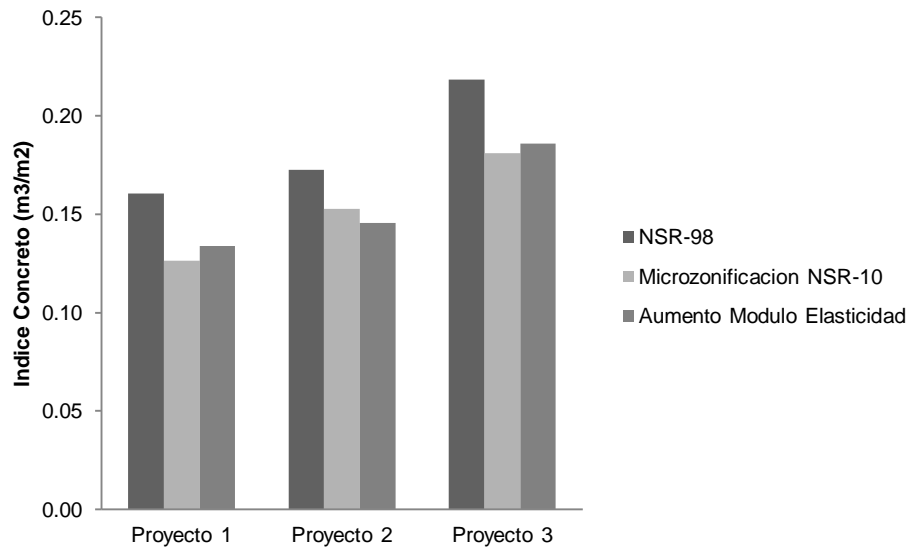


Figura 27 Comparación cantidades de concreto analizando parámetros individuales

En las tablas 18 y 19 se presentan los porcentajes de variación de cantidades de acero (ver tabla 18) y de concreto (tabla 19) analizados para cada uno de los parámetros estudiados.

Inicialmente se analizó el cambio en la Microzonificación Sísmica de Bogotá, la mínima variación de Sa en los parámetros sísmicos se presentó en el proyecto 2, lo cual concuerda con la menor variación de cantidades de acero para este proyecto con un 8.5% y en concreto con una variación del 11.5%.

La máxima variación, en este caso disminución de Sa se presenta en el proyecto 1 la cual fue de 29%, lo cual se evidencia en la disminución tanto de acero de refuerzo 13.6% y concreto 21.2% siendo esta última la máxima variación de las cantidades de los proyectos teniendo en cuenta el cambio de la Microzonificación Sísmica de Bogotá.

El segundo parámetro analizado fue el aumento en el valor del módulo de elasticidad, el cual fue de 20.5%. Los resultados de variación de acero de refuerzo para este parámetro son constantes y para los proyectos disminuyeron en un rango de 3.6% a 4.3%. En el análisis de este parámetro los resultados de variación de cantidades de concreto corresponden al aumento del valor teórico del módulo de elasticidad y para los tres proyectos se encuentran en un rango de 14.9% y 16.7%.

Posteriormente se determinaron los porcentajes de variación teniendo en cuenta los cambios en cuanto a las irregularidades de los proyectos y la ausencia de redundancia. Para este parámetro se determinó que el aumento de fuerza sísmica para el proyecto 2 era de 48% y para los proyectos 1 y 3 era de 33%, lo cual resulta en un aumento de las cantidades de 15.3% y 15.4% de acero para los proyectos 1 y 3 respectivamente. Y el proyecto 2 el cual tiene un aumento considerable en la fuerza sísmica tiene una variación de acero de refuerzo de 23.1%.

El último parámetro analizado fue el cambio en las combinaciones de carga y los coeficientes de reducción de resistencia. El resultado en la variación de las cantidades de acero de refuerzo es el menor, comparado con los porcentajes de variación de los parámetros analizados anteriormente, y está en un rango de disminución de cantidades de 2% a 2.4 %.

Las cantidades de concreto para los parámetros de irregularidades y ausencia de redundancia y combinaciones de carga y coeficientes de reducción de resistencia, permanecen constantes, debido a que la variación en estos parámetros afecta únicamente el diseño de la estructura. Es decir, no se modifica la rigidez de la edificación por lo que no existe variación de cantidades de concreto.

Tabla 18. Variaciones cantidades de acero de refuerzo para los parámetros de análisis

Parámetro de análisis	% Variación		
	Cantidades de acero de refuerzo		
	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3
Microzonificación NSR-10	-13.6	-8.5	-13.9
Aumento Modulo Elasticidad	-4.3	-4.0	-3.6
Irregularidades y Ausencia redundancia	15.3	23.1	15.4
Combinaciones de carga y Coeficientes de reducción de resistencia	-2.0	-2.1	-2.4

Tabla 19. Variaciones cantidades de concreto para los parámetros de análisis

Parámetro de análisis	% Variación		
	Cantidades de concreto		
	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3
Microzonificación NSR-10	-21.2	-11.5	-17.1
Aumento Modulo Elasticidad	-16.7	-15.7	-14.9

4.3. Resultados del análisis y diseño estructural según NSR-98 y NSR-10

En las figuras 28 y 29 se presentan los índices de cantidades de acero de refuerzo y concreto del resultado del análisis y diseño estructural con la NSR-98 y NSR-10 para la estructura y la cimentación del proyecto. En las tablas 20 y 21 se presentan los porcentajes de variación de cantidades de acero de refuerzo (tabla 20) y de concreto (tabla 21)

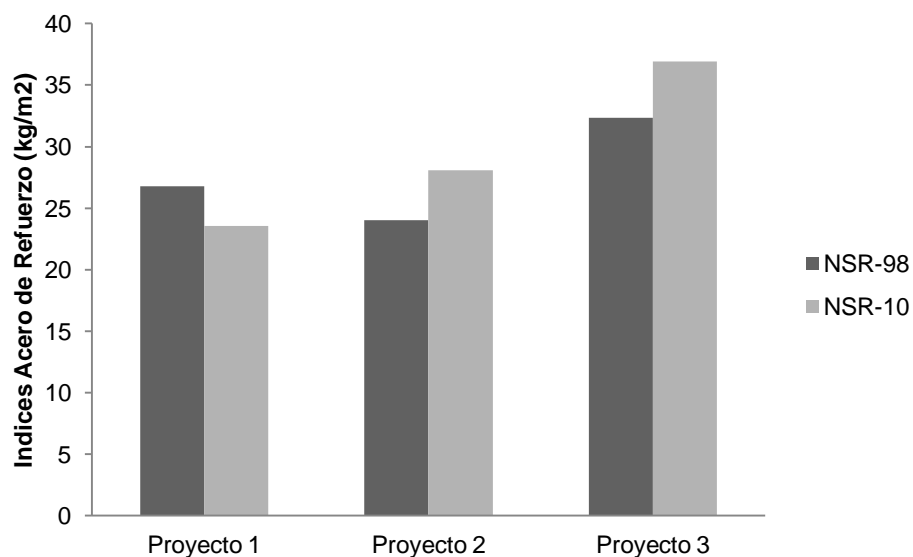


Figura 28 Índices acero de refuerzo según NSR-98 y NSR-10

Tabla 20. Variación acero de refuerzo NSR-98 y NSR-10

% Variación		
Cantidades de acero		
Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3
-12.1	17.1	14.2

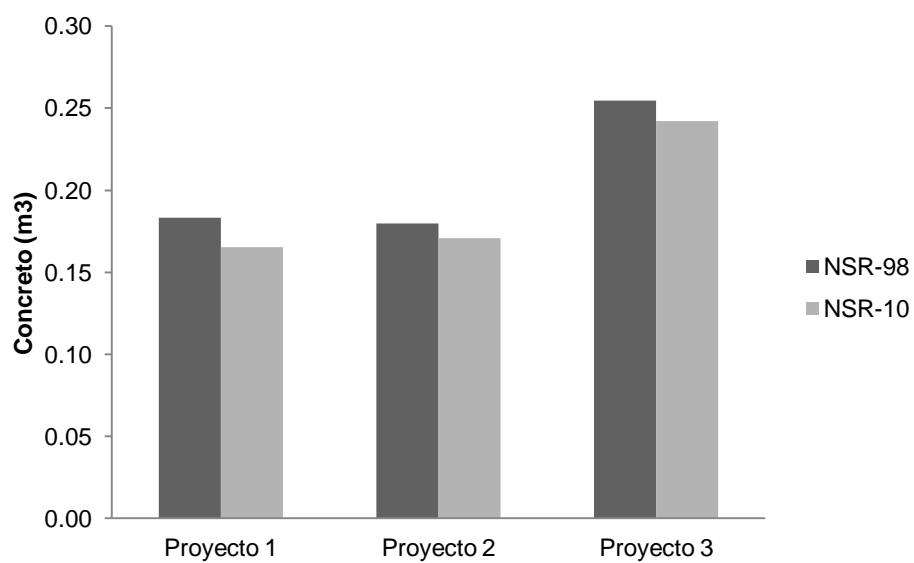


Figura 29 Cantidades de concreto según NSR-98 y NSR-10

Tabla 21. Variación concreto NSR-98 y NSR-10

% Variación		
Cantidades de concreto		
Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3
-9.9	-5.0	-4.8

El proyecto 1 presento una disminución considerable de 29% en el valor de S_a , en consecuencia las cantidades tanto de acero de refuerzo como de concreto disminuyeron 12.1% y 9.9% respectivamente.

El proyecto 2 presento la máxima variación en el análisis de irregularidades y ausencia de redundancia, debido al aumento de fuerza sísmica de 48% y un aumento de cantidades de acero de refuerzo de 23.1% considerando individualmente este parámetro de diseño (ver tabla 18). Por esta razón presentó un aumento de las cantidades de acero de refuerzo en el análisis detallado de 17.1%.

En cuanto al proyecto 3 mostró una disminución del valor de diseño de S_a de 20% debido a esto las cantidades de acero disminuyeron 13.9% en el análisis teórico de las variables de diseño (ver tabla 18). Adicionalmente presento un aumento de fuerza sísmica de 33% de tal manera que las cantidades de acero aumentaron 15.4% ver tabla 18. Se infiere que las anteriores son las causas de un resultado de aumento de 14.2% en las cantidades de acero de refuerzo.

Los resultados de la disminución de cantidades de concreto para cada proyecto responden a la aplicación del cambio en la Microzonificación Sísmica de Bogotá y el aumento en el modulo de elasticidad. En consecuencia es necesario modificar las secciones de los elementos vigas, columnas y pantallas para ajustar las derivas a los requisitos de la Norma.

Las anteriores deducciones se realizaron a partir de los resultados del análisis y diseño estructural de los proyectos considerando individualmente parámetros de diseño de la sección anterior. Sin embargo se aclara que no se analizó el impacto de todos los cambios de la normatividad. Los datos de las figuras 28, 29 y tablas 20 y 21 son el resultado de la aplicación de la NSR-98 y NSR-10 con todos sus cambios.

4.4. Resultados del análisis de presupuestos de los proyectos según NSR-98 y NSR-10

El presupuesto de los proyectos se dividió en capítulos, subcapítulos y actividades. Los capítulos definidos aplicables según las características del proyecto son: cimentaciones profundas, cimentaciones y estructuras aéreas. Para realizar la evaluación económica se utilizaron precios de lista de materiales y costos típicos de equipo y mano de obra para el año 2011. En el anexo 1 se presenta el análisis de precios unitarios APU realizado para cada una de las actividades.

En las tablas 22 a 27 se presentan los presupuestos de los proyectos analizadas según los requerimientos de la NSR-98 y NSR-10.

Tabla 22. Presupuesto proyecto 1 NSR-98

Capítulo	Descripción	Und	Cantidad Total	Valores Unitarios				Valor Parcial	Valor Total
				Materiales	Equipo	Mano Obra	Otros		
01	CIMENTACIONES PROFUNDAS								
01 1	PROCESO								
01 1 1	EJECUCIÓN PILOTES D=30 cm	M3	79.2	0.00	0.00	0.00	38,000.00	38,000.00	3,008,389.13
01 1 2	MANEJO DEL ACERO	KG	3442.6	0.00	0.00	0.00	310.00	310.00	1,067,206.00
	TOTAL SUBCAPÍTULO								4,075,595.13
01 3	SUMINISTRO DE CONCRETO								
01 3 1	CONCRETO 3.000 PSI PILOTES	M3	79.2	364,314.24	0.00	0.00	0.00	364,314.24	28,842,078.89
	TOTAL SUBCAPÍTULO								28,842,078.89
01 4	ACERO DE REFUERZO								
01 4 1	REFUERZO FIGURADO	TON	3.4	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	8,448,955.51
	TOTAL SUBCAPÍTULO								8,448,955.51
	TOTAL CAPÍTULO								41,366,629.52
02	CIMENTACIONES								
02 1	EXCAVACIONES MANUALES								
02 1 1	EXCAVACIÓN Y RETIRO A MANO MATERIAL COMÚN 0-1 M3	M3	292.6	1,104.10	23,203.32	18,654.51	0.00	42,961.93	12,570,659.85
	TOTAL SUBCAPÍTULO								12,570,659.85
02 2	CIMENTACIÓN CONCRETO								
02 2 1	VIGAS CIMENTACIÓN CONCRETO	M3	102.5	41,718.28	25,013.43	125,665.69	0.00	192,397.40	19,729,391.89
02 2 2	DADOS EN CONCRETO	M3	16.4	33,384.77	25,013.43	124,365.76	0.00	182,763.96	2,992,759.86
	TOTAL SUBCAPÍTULO								22,722,151.75
02 4	SUMINISTRO DE CONCRETO								
02 4 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	118.9	301,723.31	0.00	0.00	0.00	301,723.31	35,880,935.79
	TOTAL SUBCAPÍTULO								35,880,935.79
02 5	ACERO DE REFUERZO								
02 5 1	REFUERZO FIGURADO	TON	11.7	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	28,765,765.60
	TOTAL SUBCAPÍTULO								28,765,765.60
	TOTAL CAPÍTULO								99,939,512.99
03	ESTRUCTURAS AÉREAS								
03 1	ESTRUCTURAS CONCRETO								
03 1 1	COLUMNAS RECTANGULARES EN CONCRETO	M3	31.6	96,175.52	34,084.12	196,917.55	0.00	327,177.19	10,337,981.13
03 1 2	PANTALLAS EN CONCRETO	M3	90.6	166,338.02	30,246.51	196,917.55	0.00	393,502.08	35,636,531.81
03 1 3	VIGAS AÉREAS CONCRETO	M3	154.7	28,400.73	51,094.59	207,278.12	0.00	286,773.44	44,369,586.34
	TOTAL SUBCAPÍTULO								90,344,099.28
03 3	SUMINISTRO DE CONCRETO								
03 3 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	276.9	301,723.31	0.00	0.00	0.00	301,723.31	83,541,149.52
	TOTAL SUBCAPÍTULO								83,541,149.52
03 4	ACERO DE REFUERZO								
03 4 1	REFUERZO FIGURADO	TON	47.0	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	115,304,632.93
	TOTAL SUBCAPÍTULO								115,304,632.93
	TOTAL CAPÍTULO								289,189,881.73
	TOTAL PRESUPUESTO								430,496,024.24
	ÁREA	M2							2101.4
	COSTO M2								204,861.53

Tabla 23. Presupuesto proyecto 1 NSR-10

Capitulo	Descripcion	Und	Cantidad Total	Valores Unitarios				Valor Parcial	Valor Total
				Materiales	Equipo	Mano Obra	Otros		
01	CIMENTACIONES PROFUNDAS								
01 1	PROCESO								
01 1 1	EJECUCION PILOTES D=30 cm	M3	79.2	0.00	0.00	0.00	38,000.00	3,008,389.13	
01 1 2	MANEJO DEL ACERO	KG	3442.6	0.00	0.00	0.00	310.00	1,067,206.00	
	TOTAL SUBCAPITULO							4,075,595.13	
01 3	SUMINISTRO DE CONCRETO								
01 3 1	CONCRETO 3.000 PSI PILOTES	M3	79.2	364,314.24	0.00	0.00	0.00	28,842,078.89	
	TOTAL SUBCAPITULO							28,842,078.89	
01 4	ACERO DE REFUERZO								
01 4 1	REFUERZO FIGURADO	TON	3.4	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	8,448,955.51	
	TOTAL SUBCAPITULO							8,448,955.51	
	TOTAL CAPITULO							41,366,629.52	
02	CIMENTACIONES								
02 1	EXCAVACIONES MANUALES								
02 1 1	EXCAVACION Y RETIRO A MANO MATERIAL COMUN 0-1 M3		292.6	1,104.10	23,203.32	18,654.51	0.00	12,570,659.85	
	TOTAL SUBCAPITULO							12,570,659.85	
02 2	CIMENTACION CONCRETO								
02 2 1	VIGAS CIMENTACION CONCRETO	M3	102.5	41,718.28	25,013.43	125,665.69	0.00	19,729,391.89	
02 2 2	DADOS EN CONCRETO	M3	16.4	33,384.77	25,013.43	124,365.76	0.00	2,992,759.86	
	TOTAL SUBCAPITULO							22,722,151.75	
02 4	SUMINISTRO DE CONCRETO								
02 4 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	118.9	301,723.31	0.00	0.00	0.00	35,880,935.79	
	TOTAL SUBCAPITULO							35,880,935.79	
02 5	ACERO DE REFUERZO								
02 5 1	REFUERZO FIGURADO	TON	11.9	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	29,283,462.31	
	TOTAL SUBCAPITULO							29,283,462.31	
	TOTAL CAPITULO							100,457,209.70	
03	ESTRUCTURAS AEREAS								
03 1	ESTRUCTURAS CONCRETO								
03 1 1	COLUMNAS RECTANGULARES EN CONCRETO	M3	31.9	96,175.52	34,084.12	196,917.55	0.00	10,445,949.60	
03 1 2	PANTALLAS EN CONCRETO	M3	56.0	166,338.02	30,246.51	196,917.55	0.00	22,049,888.86	
03 1 3	VIGAS AEREAS CONCRETO	M3	150.7	28,400.73	51,094.59	207,278.12	0.00	43,227,425.09	
	TOTAL SUBCAPITULO							75,723,263.55	
03 3	SUMINISTRO DE CONCRETO								
03 3 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	238.7	301,723.31	0.00	0.00	0.00	72,021,263.10	
	TOTAL SUBCAPITULO							72,021,263.10	
03 4	ACERO DE REFUERZO								
03 4 1	REFUERZO FIGURADO	TON	39.9	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	98,001,331.08	
	TOTAL SUBCAPITULO							98,001,331.08	
	TOTAL CAPITULO							245,745,857.74	
	TOTAL PRESUPUESTO							387,569,696.96	
	AREA	M2						2101.4	
	COSTO M2							184,434.04	

Tabla 24. Presupuesto proyecto 2 NSR-98

Capitulo	Descripcion	Und	Cantidad Total	Valores Unitarios				Valor Parcial	Valor Total
				Materiales	Equipo	Mano Obra	Otros		
01	CIMENTACIONES PROFUNDAS								
01 1	PROCESO								
01 1 1	EJECUCION PILOTES D=30 cm	M3	101.9	0.00	0.00	0.00	38,000.00	38,000.00	3,871,510.29
01 1 2	MANEJO DEL ACERO	KG	4003.7	0.00	0.00	0.00	310.00	310.00	1,241,143.59
	TOTAL SUBCAPITULO								5,112,653.88
01 3	SUMINISTRO DE CONCRETO								
01 3 1	CONCRETO 3.000 PSI PILOTES	M3	101.9	364,314.24	0.00	0.00	0.00	364,314.24	37,117,008.66
	TOTAL SUBCAPITULO								37,117,008.66
01 4	ACERO DE REFUERZO								
01 4 1	REFUERZO FIGURADO	TON	4.0	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	9,826,000.76
	TOTAL SUBCAPITULO								9,826,000.76
	TOTAL CAPITULO								52,055,663.31
02	CIMENTACIONES								
02 1	EXCAVACIONES MANUALES								
02 1 1	EXCAVACION Y RETIRO A MANO MATERIAL COMUN 0-1 M3	M3	552.5	1,104.10	23,203.32	18,654.51	0.00	42,961.93	23,736,464.69
	TOTAL SUBCAPITULO								23,736,464.69
02 2	CIMENTACION CONCRETO								
02 2 1	VIGAS CIMENTACION CONCRETO	M3	161.2	41,718.28	25,013.43	125,665.69	0.00	192,397.40	31,010,613.74
02 2 2	DADOS EN CONCRETO	M3	9.5	33,384.77	25,013.43	124,365.76	0.00	182,763.96	1,727,777.38
	TOTAL SUBCAPITULO								32,738,391.12
02 4	SUMINISTRO DE CONCRETO								
02 4 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	170.6	301,723.31	0.00	0.00	0.00	301,723.31	51,484,134.25
	TOTAL SUBCAPITULO								51,484,134.25
02 5	ACERO DE REFUERZO								
02 5 1	REFUERZO FIGURADO	TON	16.9	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	41,381,867.89
	TOTAL SUBCAPITULO								41,381,867.89
	TOTAL CAPITULO								149,340,857.95
03	ESTRUCTURAS AEREAS								
03 1	ESTRUCTURAS CONCRETO								
03 1 1	COLUMNAS RECTANGULARES EN CONCRETO	M3	74.3	96,175.52	34,084.12	196,917.55	0.00	327,177.19	24,323,006.34
03 1 2	PANTALLAS EN CONCRETO	M3	102.9	166,338.02	30,246.51	196,917.55	0.00	393,502.08	40,510,448.53
03 1 3	VIGAS AEREAS CONCRETO	M3	268.4	28,400.73	51,094.59	207,278.12	0.00	286,773.44	76,974,183.41
	TOTAL SUBCAPITULO								141,807,638.28
03 3	SUMINISTRO DE CONCRETO								
03 3 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	445.7	301,723.31	0.00	0.00	0.00	301,723.31	134,479,623.20
	TOTAL SUBCAPITULO								134,479,623.20
03 4	ACERO DE REFUERZO								
03 4 1	REFUERZO FIGURADO	TON	66.1	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	162,304,788.72
	TOTAL SUBCAPITULO								162,304,788.72
	TOTAL CAPITULO								438,592,050.21
	TOTAL PRESUPUESTO								639,988,571.46
	AREA	M2							3375.45
	COSTO M2								189,600.96

Tabla 25. Presupuesto proyecto 2 NSR-10

Capitulo	Descripcion	Und	Cantidad Total	Valores Unitarios				Valor Parcial	Valor Total
				Materiales	Equipo	Mano Obra	Otros		
01	CIMENTACIONES PROFUNDAS								
01 1	PROCESO								
01 1 1	EJECUCION PILOTES D=30 cm	M3	101.9	0.00	0.00	0.00	38,000.00	38,000.00	3,871,510.29
01 1 2	MANEJO DEL ACERO	KG	4003.7	0.00	0.00	0.00	310.00	310.00	1,241,143.59
	TOTAL SUBCAPITULO								5,112,663.88
01 3	SUMINISTRO DE CONCRETO								
01 3 1	CONCRETO 3.000 PSI PILOTES	M3	101.9	364,314.24	0.00	0.00	0.00	364,314.24	37,117,008.66
	TOTAL SUBCAPITULO								37,117,008.66
01 4	ACERO DE REFUERZO								
01 4 1	REFUERZO FIGURADO	TON	4.0	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	9,826,000.76
	TOTAL SUBCAPITULO								9,826,000.76
	TOTAL CAPITULO								52,055,663.31
02	CIMENTACIONES								
02 1	EXCAVACIONES MANUALES								
02 1 1	EXCAVACION Y RETIRO A MANO MATERIAL COMUN 0-1 M3	M3	552.5	1,104.10	23,203.32	18,654.51	0.00	42,961.93	23,736,464.69
	TOTAL SUBCAPITULO								23,736,464.69
02 2	CIMENTACION CONCRETO								
02 2 1	VIGAS CIMENTACION CONCRETO	M3	161.2	41,718.28	25,013.43	125,665.69	0.00	192,397.40	31,010,613.74
02 2 2	DADOS EN CONCRETO	M3	9.5	33,384.77	25,013.43	124,365.76	0.00	182,763.96	1,727,777.38
	TOTAL SUBCAPITULO								32,738,391.12
02 4	SUMINISTRO DE CONCRETO								
02 4 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	170.6	301,723.31	0.00	0.00	0.00	301,723.31	51,484,134.25
	TOTAL SUBCAPITULO								51,484,134.25
02 5	ACERO DE REFUERZO								
02 5 1	REFUERZO FIGURADO	TON	16.6	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	40,632,957.54
	TOTAL SUBCAPITULO								40,632,957.54
	TOTAL CAPITULO								148,591,947.60
03	ESTRUCTURAS AEREAS								
03 1	ESTRUCTURAS CONCRETO								
03 1 1	COLUMNAS RECTANGULARES EN CONCRETO	M3	75.4	96,175.52	34,084.12	196,917.55	0.00	327,177.19	24,655,418.36
03 1 2	PANTALLAS EN CONCRETO	M3	80.6	166,338.02	30,246.51	196,917.55	0.00	393,502.08	31,735,548.97
03 1 3	VIGAS AEREAS CONCRETO	M3	259.3	28,400.73	51,094.59	207,278.12	0.00	286,773.44	74,352,896.39
	TOTAL SUBCAPITULO								130,743,863.73
03 3	SUMINISTRO DE CONCRETO								
03 3 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	415.3	301,723.31	0.00	0.00	0.00	301,723.31	125,299,957.07
	TOTAL SUBCAPITULO								125,299,957.07
03 4	ACERO DE REFUERZO								
03 4 1	REFUERZO FIGURADO	TON	80.3	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	196,999,573.14
	TOTAL SUBCAPITULO								196,999,573.14
	TOTAL CAPITULO								453,043,393.94
	TOTAL PRESUPUESTO								653,691,004.84
	AREA	M2							3375.45
	COSTO M2								193,660.40

Tabla 26. Presupuesto proyecto 3 NSR-98

Capitulo	Descripcion	Und	Cantidad Total	Valores Unitarios				Valor Parcial	Valor Total
				Materiales	Equipo	Mano Obra	Otros		
01	CIMENTACIONES								
01 1	EXCAVACIONES MANUALES								
01 1 1	EXCAVACION Y RETIRO A MANO MATERIAL COMUN 0-1 M3		141.3	1,104.10	23,203.32	18,654.51	0.00	42,961.93	6,072,066.92
	TOTAL SUBCAPITULO								6,072,066.92
01 2	CIMENTACION CONCRETO								
01 2 1	VIGAS CIMENTACION CONCRETO	M3	61.9	41,718.28	25,013.43	125,665.69	0.00	192,397.40	11,918,326.61
	TOTAL SUBCAPITULO								11,918,326.61
01 4	SUMINISTRO DE CONCRETO								
01 4 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	61.9	250,652.80	0.00	0.00	0.00	250,652.80	15,527,038.61
	TOTAL SUBCAPITULO								15,527,038.61
01 5	ACERO DE REFUERZO								
01 5 1	REFUERZO FIGURADO	TON	7.8	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	19,087,752.86
	TOTAL SUBCAPITULO								19,087,752.86
	TOTAL CAPITULO								52,605,185.00
02	ESTRUCTURAS AEREAS								
02 1	ESTRUCTURAS CONCRETO								
02 1 1	COLUMNAS RECTANGULARES EN CONCRETO	M3	0.0	96,175.52	34,084.12	196,917.55	0.00	327,177.19	0.00
02 1 2	PANTALLAS EN CONCRETO	M3	74.6	166,338.02	30,246.51	196,917.55	0.00	393,502.08	29,363,124.95
02 1 3	VIGAS AÉREAS CONCRETO	M3	133.2	28,400.73	51,094.59	207,278.12	0.00	286,773.44	38,204,530.97
	TOTAL SUBCAPITULO								67,567,655.92
01 4 1	SUMINISTRO DE CONCRETO								
01 4 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	207.8	301,723.31	0.00	0.00	0.00	301,723.31	62,710,775.78
	TOTAL SUBCAPITULO								62,710,775.78
01 5	ACERO DE REFUERZO								
01 5 1	REFUERZO FIGURADO	TON	26.5	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	65,003,479.59
	TOTAL SUBCAPITULO								65,003,479.59
	TOTAL CAPITULO								195,281,911.30
	TOTAL PRESUPUESTO								247,887,096.30
	AREA	M2							1060.02
	COSTO M2								233,851.34

Tabla 27. Presupuesto proyecto 3 NSR-10

Capitulo	Descripcion	Und	Cantidad Total	Valores Unitarios				Valor Parcial	Valor Total
				Materiales	Equipo	Mano de Obra	Otros		
01	CIMENTACIONES								
01 1	EXCAVACIONES MANUALES								
01 1 1	EXCAVACION Y RETIRO A MANO MATERIAL COMUN 0-1 M3		141.3	1,104.10	23,203.32	18,654.51	0.00	42,961.93	6,072,066.92
	TOTAL SUBCAPITULO								6,072,066.92
01 2	CIMENTACION CONCRETO								
01 2 1	VIGAS CIMENTACION CONCRETO	M3	61.9	41,718.28	25,013.43	125,665.69	0.00	192,397.40	11,918,326.61
	TOTAL SUBCAPITULO								11,918,326.61
01 4	SUMINISTRO DE CONCRETO								
01 4 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	61.9	301,723.31				301,723.31	18,690,672.73
	TOTAL SUBCAPITULO								18,690,672.73
01 5	ACERO DE REFUERZO								
01 5 1	REFUERZO FIGURADO	TON	8.1	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	19,777,859.70
	TOTAL SUBCAPITULO								19,777,859.70
	TOTAL CAPITULO								56,458,925.95
02	ESTRUCTURAS AEREAS								
02 1	ESTRUCTURAS CONCRETO								
02 1 1	COLUMNAS RECTANGULARES EN CONCRETO	M3	17.6	96,175.52	34,084.12	196,917.55	0.00	327,177.19	5,754,719.52
02 1 2	PANTALLAS EN CONCRETO	M3	44.0	166,338.02	30,246.51	196,917.55	0.00	393,502.08	17,303,270.06
02 1 3	VIGAS AÉREAS CONCRETO	M3	133.2	28,400.73	51,094.59	207,278.12	0.00	286,773.44	38,204,530.97
	TOTAL SUBCAPITULO								61,262,520.55
01 4 1	SUMINISTRO DE CONCRETO								
01 4 1	CONCRETO PREMEZCLADO CORRIENTE 3.000 PSI	M3	194.8	301,723.31	0.00	0.00	0.00	301,723.31	58,770,721.96
	TOTAL SUBCAPITULO								58,770,721.96
01 5	ACERO DE REFUERZO								
01 5 1	REFUERZO FIGURADO	TON	31.1	2,291,000.00	7,776.00	155,460.77	0.00	2,454,236.77	76,240,889.84
	TOTAL SUBCAPITULO								76,240,889.84
	TOTAL CAPITULO								196,274,132.35
	TOTAL PRESUPUESTO								252,733,058.31
	AREA	M2							1060.02
	COSTO M2								238,422.91

En la figura 30 se presentan los índices de costo resultado del análisis y diseño estructural con la NSR-98 y NSR-10 para la estructura y cimentación de los proyectos evaluados. En la tabla 28 se presentan los porcentajes de variación de los índices de los proyectos.

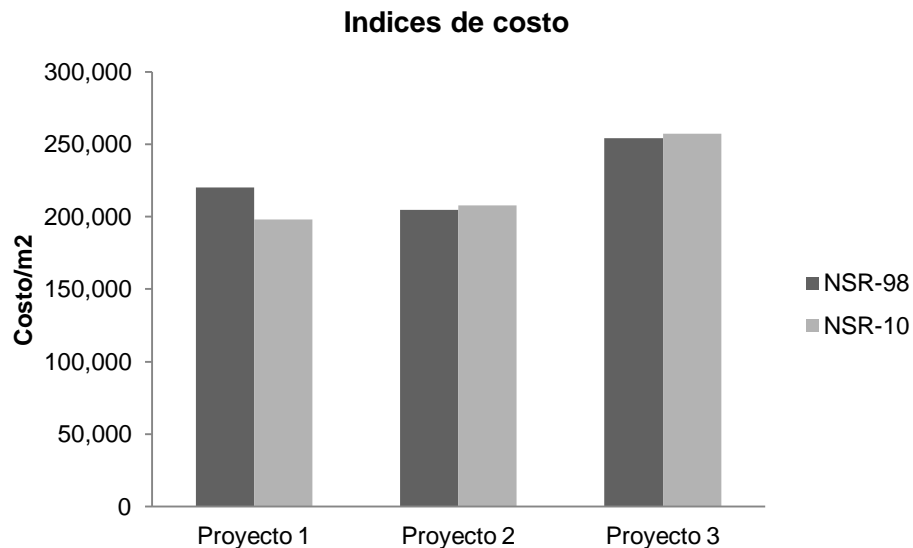


Figura 30 Índices de costo según NSR-98 y NSR-10

Tabla 28. Variación de índices de costos NSR-98 y NSR-10

% Variación Índices de costo		
Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3
-10.0	2.1	2.0

El costo del proyecto 1 disminuyó 10.0% y los proyectos 2 y 3 aumentaron 2.1% y 2.0% respectivamente. Se deduce que la variación del proyecto 1 obedece a la disminución del valor de Sa. Se infiere que los resultados de porcentajes de variación no significativos para los proyectos 2 y 3 se deben al resultado combinado de disminución de valor de Sa y aumento fuerza sísmica debido a la reducción del valor R. Analizando la diferencia entre los proyectos 2 y 3 en cuanto

a la variación del índice de costo, el proyecto 2 presenta una disminución mayor del valor de R comparado con el proyecto 3, por lo cual es de esperarse que la variación del índice de costo sea mayor en el proyecto 2, aunque esta variación no es significativa.

La variación de los índices de costos de los proyectos presentados en la tabla 28 corresponde al resultado de la aplicación de la NSR-98 y NSR-10 de acuerdo con procedimientos convencionales de oficina de diseño estructural.

5. DISCUSIÓN

Las variables analizadas individualmente representan cambios que afectan los resultados del análisis y diseño de las edificaciones. Fue determinado teóricamente el impacto en las cantidades de acero y concreto del cambio de la Microzonificación sísmica de Bogotá, el modulo de elasticidad, las irregularidades y ausencia de redundancia y finalmente las combinaciones de carga y coeficientes de reducción de resistencia.

Analizando el cambio en la microzonificación sísmica de Bogotá, comparativamente el espectro de la NSR-10 disminuyó con respecto a la NSR-98 para todos los proyectos. La causa de esto es el cambio del valor de la aceleración horizontal pico efectiva para diseño Aa de 0.20 a 0.15 para periodos cortos ($T < 1s$). Por tanto disminuye la fuerza sísmica aplicada lo cual se refleja en menores cantidades de acero. Así mismo las cantidades de concreto son menores por causa de la menor fuerza aplicada y la rigidez del edificio puede ser variada disminuyendo secciones de pantallas, columnas o vigas para ajustar el valor de deriva a 1%.

El valor del modulo de elasticidad para el análisis de la estructura fue aumentado en 20.5% en la NSR-10, lo cual trae como consecuencia un aumento de la rigidez del edificio y disminución de los valores de deriva del edificio analizado según la NSR-98. Para ajustar las derivas según la normativa pueden ser disminuidas las

secciones de pantallas columnas y vigas con lo que se disminuyen las cantidades de concreto y acero de la estructura.

Las modificaciones realizadas en la NSR-10 en las irregularidades y ausencia de redundancia afectan el valor de R, por lo que se varía la capacidad de disipación del sistema estructural en el rango inelástico. En los proyectos según las irregularidades en planta, altura y el análisis de ausencia de redundancia los valores de R disminuyeron en todos los casos. Por lo tanto existe un aumento de la fuerza sísmica y cantidades de acero. Las cantidades de concreto no variaron, debido a que el R está relacionado con el diseño de la edificación y no modifica la rigidez del edificio.

Las combinaciones de carga de la NSR-10 son menores a las utilizadas en la NSR-98. Al mismo tiempo los valores de los coeficientes de reducción de resistencia son menores a los prescritos en la NSR-98. Estas modificaciones hacen que los valores de las combinaciones de carga concuerden con los factores de reducción de resistencia para una misma probabilidad de falla estructural. El resultado de estos cambios es la disminución de cantidades de acero.

De las variables analizadas las que tienen un mayor impacto aumentando las cantidades de acero son las irregularidades y ausencia de redundancia y el cambio en la Microzonificación genera un impacto disminuyendo las cantidades de acero y concreto. El aumento del modulo de elasticidad genera una disminución en las cantidades de acero en menor cuantía que las variables descritas anteriormente. Sin embargo adicionalmente disminuye las secciones y por tanto los volúmenes de concreto, por lo que constituye un cambio significativo. Las modificaciones en las combinaciones de carga y los coeficientes de reducción de resistencia generan el menor impacto disminuyendo las cantidades de acero.

El impacto en los costos se determinó realizando el presupuesto de la estructura analizada bajo las consideraciones de la NSR-98 y NSR-10, específicamente para los elementos de resistencia sísmica y la cimentación. Los resultados muestran

que se presenta una disminución del índice de costo para el proyecto 1 y un aumento en los índices de costo para los proyectos 2 y 3. La variación que se presenta para estos últimos es baja.

En el estudio “Impacto Económico de la NSR-10 en el Sistema Sismo Resistente de Edificaciones DMO de Concreto Reforzado” para edificaciones aporticadas de concreto reforzado de 5 pisos, analizando específicamente el cambio del espectro de aceleraciones de la NSR-10, los resultados obtenidos son aumento de derivas hasta en un 20%. Sin embargo el aumento en el costo del concreto y el acero de las vigas y columnas solo fue del 7% [10].

Los resultados de las variaciones en las cantidades de acero y concreto finales de la estructura no son de la magnitud de la variación teórica del parámetro.

Adicionalmente a las variables analizadas en este estudio existen otras variables que fueron modificadas en la NSR-10 las cuales fueron aplicadas en el diseño de los edificios según la NSR-10. Los resultados de variación de índices de costos finales son el resultado de la aplicación combinada de las variaciones de acuerdo con procedimientos convencionales de oficina de diseño estructural.

6. CONCLUSIONES

Las variaciones del costo del cambio de normatividad sismo resistente están vinculadas a consideraciones de configuración de la edificación y parámetros sísmicos. De esta forma edificaciones irregulares deben ser diseñadas con valores de R menores y esto produce un aumento de la fuerza sísmica para el diseño de los elementos de resistencia sísmica, lo cual aumenta los costos de la estructura. Adicionalmente el cambio de los parámetros derivados de la actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá afecta el costo de la estructura del proyecto, los espectros de diseño son menores a los prescritos según la Microzonificación Sísmica de Bogotá asociada a la NSR-98, por lo que el costo de la estructura disminuye en este caso.

El impacto en el costo de las consideraciones estudiadas relacionadas con propiedades de los materiales, específicamente el cambio del valor del modulo de elasticidad y cambios en parámetros de diseño, puntualmente la disminución de los factores de carga y los coeficientes de reducción de resistencia, son las modificaciones menos representativas de las estudiadas.

La aplicación de la actualización de la norma sismo resistente no presentó un cambio significativo en los costos del sistema de resistencia sísmica en las edificaciones estudiadas. Una de las posibles causas de la diferencia de la variación teórica de los cambios en relación a la variación real de los costos, es la aplicación de aspectos constructivos considerados en el despiece de los elementos.

No existe un sobrecosto, ni tampoco un ahorro considerable en los costos derivados del cambio de norma sismo resistente. Los costos se mantienen en un rango de variación, de tal forma que no se le debe atribuir a la norma ni beneficio ni perjuicio para la industria de la construcción. Sin embargo se reclama un análisis juicioso previo al desarrollo de un proyecto, evaluando alternativas que a través del diseño arquitectónico con criterios de sismorresistencia, ofrezca la misma seguridad pero la mayor economía en los costos de la construcción. Esto puede lograrse a través de consideraciones de redundancia y control de irregularidades.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, A., *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10*. Decreto 926 del 19 de marzo de 2010.
2. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, A., *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*. 1998: Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998.
3. Salgado M.A, B.G.A., Yamin L.E, Cardona O.D, *Evaluación de la Amenaza Sísmica de Colombia. Aplicación y Uso en las Nuevas Normas Colombiana de Sismoresistencia, NSR-10*. 2011.
4. F.J., D.-P., *Zonificación de la Respuesta Sísmica de Bogotá*. 2011.
5. García, L.E., *Ciudad nocturna*. Colección LITDESON no. 1. 1988, Hermosillo, Sonora, México: Universidad de Sonora. 166 p.
6. Garcia, L.E., *Apreciaciones sobre el Diseño Sismo-Resistente en Colombia y sus Implicaciones Económicas*. 1993, Sociedad Colombiana de Ingenieros. Decimas Jornadas Estructurales de la Ingenieria Colombiana.
7. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, A., *Comentarios al CCCSR-84*. 1988.
8. Jaramillo, J.O., *Análisis Clásico de Estructuras*. 2004: Universidad Nacional de Colombia.
9. Barbosa, R.E., *Conferencia Eng Solutions RCB V.8 - NSR-10*. 2010.
10. Velez J.C, C.F.A., *Impacto Economico de la NSR-10 en el Sistema Sismo Resistente de Edificaciones DMO de Concreto Reforzado*. 2010.
11. Penagos, G.A., *Eficiencia de los Sistemas Aporticados dentro del CCCSR-84.*, in *Departamento de Ingenieria Civil* 1993, Universidad de los Andes: Bogota.

12. Escalante, F., *Impacto de la Zonificación y Requisitos Sísmicos del Decreto 1400/84 en el Costo de Estructuras de Edificios Aporticados en el País.*, in *Departamento de Ingeniería Civil*. 1991, Universidad de los Andes: Bogotá.
13. Garcia, A., *Aumento en Costos de un Edificio Diseñado según Normas Sismo Resistentes al aumentar su Número de Pisos.*, in *Departamento de Ingeniería Civil*. 1982, Universidad de los Andes: Bogota.
14. Wade, J., *Incidencias de las Cargas Sísmicas en el Costo de la Estructura para las diferentes Zonas Sísmicas* . in *Departamento de Ingeniería Civil*. 1981, Universidad de los Andes: Bogota.
15. Barbosa, R.E., *Manual de Uso EngSolutions RCB*. 2009.