

Lógica de Primer Orden: Especificación Formal

Lógica Computacional 2022-I, Nota de clase 6

Favio Ezequiel Miranda Perea Araceli Liliana Reyes Cabello
Lourdes Del Carmen González Huesca Pilar Selene Linares Arévalo

11 de noviembre de 2022
Facultad de Ciencias UNAM

Atención: Esta nota de clase es para auto estudio y no será discutida en clase.

El proceso de especificación o traducción de un lenguaje natural, en nuestro caso del español, a la lógica formal no es siempre sencillo. Algunas frases del español no se pueden traducir o especificar de una manera completamente fiel a la lógica de predicados, como veremos en algunos ejemplos. Sin embargo, el proceso es de gran importancia pues es la base de muchos métodos de especificación formal utilizados en inteligencia artificial o ingeniería de software, como son el lenguaje de especificación Z que es un lenguaje formal basado en la teoría de conjuntos de Zermelo-Fraenkel y en la lógica de predicados que se usa en la industria, especialmente en sistemas de alta integridad, como parte del proceso de desarrollo de software o hardware tanto en Europa como en Estados Unidos.

1. Algunos consejos

A continuación presentamos algunos consejos y observaciones que pretenden facilitar el proceso de especificación del español por medio de la lógica.

- Únicamente podemos especificar afirmaciones o proposiciones, no es posible traducir preguntas, exclamaciones, órdenes, invitaciones, etcétera.
- La idea básica es extraer predicados a partir de los enunciados dados en español de manera que el enunciado completo se construya al combinar dichos predicados mediante conectivos y cuantificadores.
Por ejemplo la frase *me gustan los tacos y las pizzas* debe entenderse como *me gustan los tacos y me gustan las pizzas*.
Análogamente *iré de vacaciones a la playa o a la montaña* significa *iré de vacaciones a la playa ó iré de vacaciones a la montaña*.
- La conjunción “y” se traduce como \wedge . La palabra “pero” también corresponde a una conjunción aunque el sentido original del español se pierde.
Por ejemplo *te doy dulces pero haces la tarea* sólo puede especificarse como *te doy dulces y haces la tarea*. Lo cual es diferente en el español.
- La disyunción es incluyente *comeremos pollo o vegetales* es decir, se incluye el caso en que se coman ambos.
- Con la implicación hay que ser cautelosos, sobre todo en el caso de frases de la forma *A sólo si B*, lo cual es equivalente con la frase *Si no B entonces no A*, que a su vez es equivalente con *Si A entonces B*. Es un error común intentar especificar dicha frase inicial mediante $B \rightarrow A$.

- Si en el español aparecen frases como *para todos, para cualquier, todos, cualquiera, los, las etc.* debe usarse el cuantificador universal \forall
- Si en el español frases como *para algún, existe un, alguno, alguna, uno, una etc.* debe usarse el cuantificador existencial \exists .

Importante: En ciertas ocasiones, frases en español que involucran *alguien, algo* deben especificarse con un cuantificador universal y no un existencial.

Por ejemplo, el enunciado *si hay alguien demasiado alto entonces se pegará con el marco de la puerta* se puede reescribir en español como *cualquiera demasiado alto se pegará con el marco de la puerta*, lo cual nos lleva a la fórmula $\forall x(A(x) \rightarrow C(x))$.

El lector debe convencerse de que no es posible especificar esta oración usando un cuantificador existencial.

- Cualquier especificación compuesta que involucre cuantificadores puede formarse identificando en ella alguno de los cuatro juicios aristotélicos:
 - Universal afirmativo *Todo S es P* traducido mediante $\forall x(S(x) \rightarrow P(x))$.
 - Existencial afirmativo. *Algún S es P* traducido mediante $\exists x(S(x) \wedge P(x))$.
 - Universal negativo: *Ningún S es P* traducido mediante $\forall x(S(x) \rightarrow \neg P(x))$
 - Existencial negativo: *Algún S no es P* traducido mediante $\exists x(S(x) \wedge \neg P(x))$

Por supuesto que en especificaciones complicadas S y P no serán predicados sino fórmulas compuestas.

- Pronombres como *él, ella, eso* no se refieren a un individuo particular sino que se usan como referencia a algo o alguien mencionado previamente, por lo que obtienen significado del contexto particular. Cuando un pronombre aparezca en un enunciado debe uno averiguar primero a quién o qué se refiere.

Por ejemplo, en el enunciado *Martha es amiga de Lupita pero ella no es amiga de Karla* debe traducirse como *Martha es amiga de Lupita y Lupita no es amiga de Karla*. Similarmente, cuando necesitamos de variables, como en *hay un perro con manchas y él ladra en las mañanas* es un error tratar de traducir por separado *hay un perro con manchas* y *él ladra en las mañanas* puesto que lo que existe está ligado con lo que ladra por la conjunción, de manera que debe utilizarse una variable que modele esta conexión.

- Las variables no se mencionan en español, son sólo un formalismo para representar individuos, por ejemplo la fórmula $\forall x(M(x) \rightarrow T(x))$ puede escribirse en español como *Cualquier minotauro es troyano* y no como *para cualquier x, si x es minotauro entonces x es troyano*.

Enunciados de esta forma sólo sirven como pasos intermedios en el proceso de traducción pues no forman parte del español correcto ni de la lógica formal. A este mismo respecto es prácticamente imposible que en una traducción del español figuren variables libres.

- Los esquemas $\forall x(A \rightarrow B)$ y $\exists x(A \wedge B)$ son de gran utilidad y bastante comunes. Menos comunes, aunque también adecuados, son los esquemas $\forall x(A \wedge B)$, $\forall x(A \vee B)$ y $\exists x(A \vee B)$.
- El esquema $\exists x(A \rightarrow B)$, si bien es una fórmula sintácticamente correcta, es extremadamente raro que figure en una traducción del español.
- El hecho de que se usen dos o más variables distintas no implica que éstas representen a elementos distintos del universo, de manera que para especificar dos individuos distintos no es suficiente contar simplemente con variables distintas.
Las fórmulas $\exists xP(x)$ y $\exists x\exists y(P(x) \wedge P(y))$ expresan ambas lo mismo, a saber que un objeto del universo cumple P . Se debe agregar explícitamente que x e y tienen la propiedad de ser distintos, es decir $x \neq y$.

En las siguientes secciones damos diversos ejemplos de especificación formal con lógica de predicados.

2. Especificación de listas

En lenguajes de programación dado un tipo de datos A se define el tipo de datos de las listas con elementos de tipo A , denotado L_A recursivamente como sigue:

1. La lista vacía, denotada nil es un elemento de L_A
2. Si a es un elemento de A y ℓ es una lista entonces $cons(a, \ell)$ es un elemento de L_A .
3. Son todas.

A continuación presentamos la especificación formal en lógica de predicados para este tipo de datos y para algunas de sus operaciones:

Sean nil un símbolo de constante para la lista vacía, $cons^{(2)}$ un símbolo de función para la construcción de listas y $A^{(1)}$, $L_A^{(1)}$ símbolos de predicado para el tipo A y listas de A respectivamente.

La definición del tipo de datos de listas con elementos en A se formaliza como sigue:

- $L_A(nil)$
- $\forall x \forall y (A(x) \wedge L_A(y) \rightarrow L_A(cons(x, y)))$
- $\forall x (L_A(x) \rightarrow x = nil \vee \exists y \exists z (A(y) \wedge L_A(z) \wedge x = cons(y, z)))$

La última fórmula indica que cualquier lista sólo puede tener una de dos formas.

Otras especificaciones acerca de listas son:

- La lista vacía no se puede construir con la función $cons$.

$$\forall x \forall y (cons(x, y) \neq nil)$$

- La concatenación de dos listas es una lista.
 - Funcionalmente: sea $app^{(2)}$ un símbolo de función que representa a la concatenación de dos listas. La especificación es

$$\forall x \forall y (L_A(x) \wedge L_A(y) \rightarrow L_A(app(x, y)))$$
 - Relacionalmente: sea $App^{(3)}$ un predicado ternario que simbolice a la relación “ z es la concatenación de x con y ”. La especificación es

$$\forall x \forall y \forall z (L_A(x) \wedge L_A(y) \wedge App(x, y, z) \rightarrow L_A(z))$$

De este ejemplo se observa que una especificación formal puede darse usando funciones o bien predicados o relaciones. Cúal opción elegir dependerá de los objetivos particulares del problema en cuestión.

- La concatenación de la lista vacía con cualquier otra lista ℓ es ℓ .
 - Funcionalmente: $\forall x (app(nil, x) = x)$
 - Relacionalmente: $\forall x App(nil, x, x)$
- La concatenación de una lista no vacía ℓ_1 con una lista cualquiera ℓ_2 es la lista cuya cabeza es la cabeza de ℓ_1 y cuya cola es la concatenación de la cola de ℓ_1 con ℓ_2 .

- Funcionalmente utilizando las funciones *cons* y *app*:

$$\forall x \forall y \forall z (app(cons(x, y), z) = cons(x, app(y, z)))$$

- Funcionalmente utilizando funciones $hd^{(1)}$ y $tl^{(1)}$ que calculan la cabeza y cola de una lista:

$$\forall x \forall y (x \neq nil \rightarrow app(x, y) = cons(hd(x), app(tl(x), y)))$$

- Relacionalmente usando el constructor de listas *cons*

$$\forall x \forall y \forall w \forall z (App(x, y, w) \rightarrow App(cons(z, x), y, cons(z, w)))$$

- Relacionalmente usando cabeza y cola:

$$\forall x \forall y \forall w \forall z (App(tl(x), y, w) \rightarrow App(x, y, cons(hd(x), w)))$$

- La reversa de una lista es una lista.

- Funcionalmente: sea *rev* un símbolo de función de índice uno que representa a la reversa de una lista. La especificación es:

$$\forall x (L_A(x) \rightarrow L_A(rev(x)))$$

- Relacionalmente: sea *Rev*(*x*, *y*) un predicado binario que represente a la relación “y es la reversa de x”. La especificación es:

$$\forall x \forall y (L_A(x) \wedge Rev(x, y) \rightarrow L_A(y))$$

- La reversa de la lista vacía es la lista vacía.

- Funcionalmente: $rev\ nil = nil$
- Relacionalmente: $Rev(nil, nil)$

- La reversa de una lista no vacía es la concatenación de la reversa de su cola con la lista que contiene a su cabeza.

- Funcionalmente: $\forall x \forall y (rev(cons(x, y)) = app(rev(y), cons(x, nil)))$
- Funcionalmente usando cabeza y cola: $\forall x (x \neq nil \rightarrow rev(x) = app(rev(tl(x)), cons(hd(x), nil)))$
- Relacionalmente usando *cons*: $\forall x Rev(cons(x, y), app(rev(y), cons(x, nil)))$
- Relacionalmente usando cabeza y cola: $\forall x (x \neq nil \rightarrow Rev(x, app(rev(tl(x)), cons(hd(x), nil))))$

3. El juego de Risk

Risk es un juego de mesa que modela estrategias de guerra en el cual pueden participar de 2 a 6 jugadores. Aquí vamos a representar algunos aspectos de la versión Risk II para computadora.

En el mundo hay jugadores, países, tarjetas y números:

- Los jugadores pueden ser humanos o virtuales manejados por la computadora. Aquí no haremos distinción. Algunos jugadores son *Barbacena*, *Bonaparte*, *Wellington*, *Solignac*, *Maransin*, *Marmont*, *Spencer*, *Mackenzie*, *Pach*, *Menelao*, *Mega*, *Charal*, *Polain*, *Ardilio*, *Taupin*, *Vauban*
- Los países son algunos de los países actuales y otros que no necesariamente corresponden a la división política actual.

- Las tarjetas se otorgan si un jugador hizo al menos una conquista en su turno. Al tener un jugador 5 tarjetas está obligado a cambiarlas. De acuerdo a la figura en la tarjeta (tropa, cañón, caballo) se reciben refuerzos por cada 3 tarjetas.
- Los números se usarán como auxiliar para contar.

Introducimos un lenguaje de predicados para representar el juego mediante ejemplos, usaremos nombres completos para constantes y nombres cortos para predicados para facilitar la correspondencia con el español.

- Solignac ha ocupado China $Oc(solignac, china)$
- Barbacena ha defendido con éxito Peru $DefEn(barbacena, peru)$
- Bonaparte ha ganado una tarjeta $Gt(bonaparte, 1)$
- Vauban vence a Mackenzie en Quebec $Ven(vauban, mackenzie, quebec)$
- Taupin se retira de Japón $Ret(taupin, japon)$
- Spencer ha intercambiado tarjetas $Int(spencer)$
- Mackenzie ataca a D'eron en Argentina desde Brasil $At(mackenzie, d'eron, argentina, brasil)$
- Menelao recibe 10 refuerzos $Ref(menelao, 10)$
- Vauban hace un movimiento táctico de Alaska a Ucrania $Tac(vauban, alaska, ucrania)$
- Spencer ha sido aniquilado por Bonaparte $Ani(bonaparte, spencer)$
- 3 tropas se colocan en Francia $Tro(3, francia)$
- 5 tropas se mueven de Quebec a Groenlandia $Mov(5, quebec, groenlandia)$
- Maransin tiene 8 refuerzos $Tref(maransin, 8)$
- Marmont tiene 5 tarjetas $Ttar(marmont, 5)$
- Wellington tiene 23 países $Tpais(wellington, 23)$

A partir de estos predicados básicos podemos representar más propiedades del juego o partida en particular. Obsérvese que algunos predicados requieren más información de la que a veces se tiene, analicemos por ejemplo el caso de un ataque:

- *Wellington ataca a Menelao.*

En este caso no se tiene información acerca de los lugares de ataque. Con el predicado definido anteriormente tendríamos

$$\exists x \exists y At(wellington, menelao, x, y)$$

Si se prefiere evitar el uso de cuantificadores se pueden definir predicados mas simples, por ejemplo:

- x ataca. $At1(x)$.
- x ataca a y . $At2(x, y)$
- x ataca a y en z $At2e(x, y, z)$
- Atacar desde el pais x hacia el pais y . $AtD(x, y)$

- *Hay un ataque.* Usando distintos predicados de ataque:

$$\begin{aligned} &\exists x At1(x) \\ &\exists x \exists y At2(x, y) \\ &\exists x \exists y \exists z At2e(x, y, z) \\ &\exists x \exists y \exists z \exists w At(x, y, z, w) \end{aligned}$$

- *Alguien ataca a Freire (Freire es atacado.)*

$$\begin{aligned} &\exists x At2(x, freire) \\ &\exists y \exists y At2e(x, freire, y) \\ &\exists x \exists z \exists w At(x, Freire, z, w) \end{aligned}$$

- *Aubert ataca*

$$\begin{aligned} &\exists x At1(aubert) \\ &\exists x At2(aubert, x) \\ &\exists x \exists y At2e(aubert, x, y) \\ &\exists y \exists z \exists w At(Aubert, y, z, w) \end{aligned}$$

- *Hay un ataque en Argentina*

$$\begin{aligned} &\exists x AtD(x, argentina) \\ &\exists x \exists y \exists z At2e(x, y, argentina) \\ &\exists x \exists y \exists w At(x, y, argentina, w) \end{aligned}$$

- *Hay un ataque desde Madagascar*

$$\begin{aligned} &\exists x AtD(madagascar, x) \\ &\exists x, y, z At(x, y, z, madagascar) \end{aligned}$$

- *Todos los países están ocupados.*

$$\forall x \exists y Oc(y, x)$$

- *Si un jugador tiene 3 tarjetas y las intercambia entonces recibe refuerzos.*

$$\forall x (Ttar(x, 3) \wedge Int(x) \rightarrow \exists y Ref(x, y))$$

- *Si un jugador tiene 5 o mas tarjetas debe intercambiarlas.*

$$\forall x, y (Ttar(x, y) \wedge y > 5 \rightarrow Int(x))$$

- *Si un jugador tiene 8 países o menos entonces recibe 3 refuerzos.*

$$\forall x \forall n (Tpais(x, n) \wedge n \leq 8 \rightarrow Ref(x, 3))$$

- Si un jugador ocupa n países con $n \geq 9$ entonces recibe $(n \bmod 3)$ refuerzos

$$\forall x \forall n (Tpais(x, n) \wedge n \geq 9 \rightarrow Ref(x, n \bmod 3))$$

Obsérvese en este ejemplo el uso de una función (*mod*) como argumento de un predicado.

- *Un país puede ser ocupado por un único jugador.*

$$\forall x \forall y \forall z (Oc(x, z) \wedge Oc(y, z) \rightarrow x = y)$$

Cuando hablamos de cosas únicas es necesario usar la igualdad.

- *Un jugador puede hacer movimiento táctico de un país a otro sólo si posee ambos países y estos están contiguos.*

$$\forall x \forall y \forall z (Tac(x, y, z) \rightarrow Oc(x, y) \wedge Oc(x, z) \wedge Cont(y, z))$$

Aquí introducimos el nuevo predicado binario $Cont(x, y)$.

- *Solignac fue aniquilado*

$$\exists y Ani(y, solignac)$$

- *Si Pach ataca a Mega en Siam y lo vence entonces lo aniquilará*

$$\exists y (At(pach, mega, siam, y) \wedge Ven(pach, mega, siam) \rightarrow Ani(pach, mega))$$

- *Polain ataca desde Ontario a Menelao quien se defiende con éxito.*

$$\exists x (At(polain, menelao, x, Ontario) \wedge DefEn(menelao, x))$$

- *Si todos atacan a Ardilio en Rusia entonces él intercambiará tarjetas y colocará 50 tropas ahí.*

$$\forall x \exists y At(x, ardilio, rusia, y) \rightarrow Int(ardilio) \wedge Trop(50, rusia)$$

- *Si Mega ataca a Polain en Venezuela y gana entonces Polain es aniquilada, Mega moverá 7 tropas ahí y recibirá 4 tarjetas.*

$$At2e(mega, polain, venezuela) \wedge Ven(mega, polain, venezuela) \rightarrow Ani(mega, polain) \wedge MovA(mega, 7, venezuela) \wedge Gt(mega, 4)$$

Aquí introducimos un nuevo predicado $MovA(x, y, z)$ para la relación “x mueve y tropas a z”.

- *Menelao recibe 10 refuerzos y los coloca en Gibraltar mientras que Mega se retira de Egipto moviendo 7 tropas hacia el Congo.*

$$Ref(menelao, 10) \wedge Tro(10, gibraltar) \wedge Ret(mega, egipto) \wedge Mov(7, egipto, congo)$$

Obsérvese que en la formalización no se captura el hecho de que las 10 tropas de refuerzo son las mismas 10 que se colocan en Gibraltar. Una mejor solución sería utilizar un nuevo predicado ternario $RefEn(x, y, z)$ para la relación “x recibe y refuerzos y los coloca en z”.

- *Todos los que ataquen a menelao serán derrotados y aniquilados por él.*

$$\forall x \forall y \forall z (At(x, menelao, y, z) \rightarrow Ven(menelao, x, y) \wedge Ani(menelao, x))$$

- *Si Mega recibe 15 refuerzos y los coloca en Filipinas entonces Charal no lo atacará en Japón y se retirará de Kamchatka a Alaska.*

$$Ref(mega, 15) \wedge Tro(15, filipinas) \rightarrow \neg At2e(charal, mega, japon) \wedge RetH(charal, kamchatka, alaska)$$

Aquí introducimos el nuevo predicado $RetH(x, y, z)$ para la relación “x se retira de y hacia z”.

3.1. Predicados para tipos

Obsérvese que aún cuando el mundo es heterogéneo en las especificaciones acerca del juego de Risk no hemos tenido el cuidado de distinguir entre los distintos tipos de objetos, con lo cual podemos construir fórmulas con argumentos incorrectos desde el punto de vista semántico. Por ejemplo

$$Tro(filipinas, mega), Ret(venezuela, peru), At2e(15, polain, mega)$$

Si bien éstas son fórmulas bien formadas, no tienen sentido en la situación que hemos fijado. Hemos preferido no especificar los tipos para simplificar las traducciones, sin embargo éstos pueden recuperarse introduciendo predicados unitarios por ejemplo $J(x), N(x), P(x)$ para las propiedades de ser jugador, número y predicado respectivamente. En tal caso por ejemplo la frase *alguién ataca a Mega* traducida antes como $\exists x At2(x, mega)$ debe traducirse ahora como $\exists x (J(x) \wedge At2(x, mega))$ de esta manera se evitan fórmulas sin sentido como las de arriba. Por ejemplo *Cualquier entero es más pequeño que un natural* se puede traducir como $\forall x \exists y (x < y)$ sin embargo se pierde mucha información por lo que debe preferirse la traducción con tipos $\forall x (Int(x) \rightarrow \exists y (Nat(y) \wedge x < y))$.

Para ahorrarnos algunos conectivos podemos introducir abreviaturas al estilo de los lenguajes de programación:

$$\forall x : A. P(x) \text{ significa } \forall x (A(x) \rightarrow P(x))$$

$$\exists x : A. P(x) \text{ significa } \exists x (A(x) \wedge P(x))$$

Por ejemplo la traducción anterior se expresa como $\forall x : Int. \exists y : Nat. (x < y)$. Veamos un último ejemplo considerando un tipo $Prog(x)$ para programas así como los predicados $F(x)$ para funcionar y $T(x)$ para terminar.

Todos los programas que funcionan terminan.

- Sin tipos: $\forall x (F(x) \rightarrow T(x))$
- Con tipos: $\forall x (P(x) \rightarrow F(x) \rightarrow T(x))$
- Con tipos abreviados: $\forall x : P. (F(x) \rightarrow T(x))$

4. Libros y Autores

Considérense las siguientes declaraciones de predicados y constantes:

$L(x, y)$	“x es más largo que y”
$E(x, y)$	“x es escrito por y”
$A(x)$	“x está escrito en alemán”
$M(x)$	“x es matemático”
$F(x)$	“x es filósofo”
$B(x)$	“x es libro”
g	“Grundlehren der Mathematik”
q	“El Quijote de la Mancha”
c	“La construcción lógica del mundo”
a	“Alicia en el país de las maravillas”
h	David Hilbert
d	Charles Dogdson.

Usaremos especificaciones con tipos para libros, matemáticos y filósofos en algunos casos:

- “*Grundlehren der Mathematik*” es un libro escrito en alemán.

$$B(g) \wedge A(g)$$

- Hay un libro más largo que “*El Quijote de la Mancha*”.

$$\exists x : B. L(x, q)$$

- “*La construcción lógica del mundo*” es un libro escrito por un filósofo y no es mas largo que “*Alicia en el país de las maravillas*”

$$(\exists x : F. E(c, x)) \wedge \neg L(c, a)$$

- “*Alicia en el país de las maravillas*” es un libro escrito por un matemático.

$$\exists x : M.(B(a) \wedge E(a, x)) \text{ equivalente a } B(a) \wedge \exists x : M.E(a, x)$$

- Hay un libro escrito en alemán por un matemático que es más largo que “*Grundlehren der Mathematik*”.

$$\exists y : B. \exists x : M. (A(y) \wedge E(y, x) \wedge L(y, g))$$

- Si “*Alicia en el país de las maravillas*” es un libro escrito por un matemático entonces es un libro escrito por un filósofo.

$$\exists x : M. (B(a) \wedge E(a, x)) \rightarrow \exists y : F (B(a) \wedge E(a, y))$$

- No hay un libro escrito en alemán por un filósofo.

$$\neg \exists x : B. (A(x) \wedge \exists y : F. E(x, y))$$

- No es el caso que cualquier libro es escrito por un filósofo.

$$\neg \forall x \exists y (F(y) \wedge E(x, y))$$

- Para cualquier libro escrito por Dogdson, “*Grundlehren der Mathematik*” es un libro más largo escrito por Hilbert.

$$\forall x : B. (E(x, d) \rightarrow E(g, h) \wedge L(g, x))$$

- Hay alguien que es filósofo y matemático y ha escrito un libro en alemán.

$$\exists x (F(x) \wedge M(x) \wedge \exists y : B(E(y, x) \wedge A(y)))$$

5. El Mundo de Cubos

Tenemos seis cubos de color amarillo, azul o verde. Un cubo puede estar sobre otro o en el piso. Considérense los predicados $S(x, y)$ representando que x está sobre y , $P(x)$ para x está en el piso, $A(x), Az(x), V(x)$ representan los colores, $L(x)$ significa que x está libre, es decir que ningún cubo está sobre x . Obsérvese que en el mundo hay cubos únicamente por lo que un predicado para “ser cubo” es redundante.

Simbolizar los siguiente:

- Hay un cubo azul en el piso con un cubo amarillo sobre él y un cubo verde sobre el amarillo.

$$\exists x \exists y \exists w (Az(x) \wedge A(y) \wedge V(w) \wedge P(x) \wedge S(y, x) \wedge S(w, y))$$

- Ningún cubo amarillo está libre.

$$\forall x (A(x) \rightarrow \neg L(x))$$

- Hay un cubo azul libre y un cubo verde libre.

$$\exists x \exists y (Az(x) \wedge L(x) \wedge V(y) \wedge L(y))$$

- Cualquier cubo amarillo tiene un cubo sobre él.

$$\forall x (A(x) \rightarrow \exists y S(y, x))$$

- No todos los cubos azules están libres.

$$\exists x (Az(x) \wedge \neg L(x))$$

- Cualquier cubo verde está libre.

$$\forall x (V(x) \rightarrow L(x))$$

- Todos los cubos en el piso son azules.

$$\forall x (P(x) \rightarrow Az(x))$$

- Cualquier cubo que esté sobre un cubo amarillo es verde o azul.

$$\forall x (\exists y (A(y) \wedge S(x, y)) \rightarrow V(x) \vee Az(x))$$

- Hay un cubo verde sobre un cubo verde.

$$\exists x \exists y (V(x) \wedge V(y) \wedge S(x, y))$$

- Hay un cubo amarillo libre en el piso.

$$\exists x (A(x) \wedge L(x) \wedge P(x))$$

- Ningún cubo está en el piso.

$$\forall x \neg P(x)$$

- Hay un cubo amarillo que está sobre uno azul y hay un cubo azul sobre él.

$$\exists x \exists y (A(x) \wedge Az(y) \wedge S(x, y) \wedge \exists w (Az(w) \wedge S(w, x)))$$

- Todos los cubos están sobre algo.

$$\forall x \exists y S(x, y)$$

6. Triángulos, Círculos, Cuadrados

El mundo consta de una cuadrícula de cualquier tamaño. Los objetos son círculos, cuadrados o triángulos y pueden ser pequeños, medianos o grandes. También se tienen las relaciones dadas por la posición, sur, norte, este, oeste y las relaciones dadas por la misma columna y el mismo renglón. Los predicados para las figuras son: $T(x)$, $C(x)$, $S(x)$ para triángulo, círculo y cuadrado respectivamente; para tamaño tenemos $P(x)$, $M(x)$, $G(x)$ para pequeño, mediano y grande. Para la posición tenemos $Su(x, y)$, $N(x, y)$, $E(x, y)$, $O(x, y)$ por ejemplo $N(x, y)$ significa x está al norte de y . Finalmente tenemos $Co(x, y)$, $R(x, y)$ para x está en la misma columna o renglón que y .

- Hay círculos medianos y cuadrados grandes

$$\exists x(C(x) \wedge M(x)) \wedge \exists y(S(y) \wedge G(y))$$

- No hay cuadrados pequeños.

$$\forall x(S(x) \rightarrow \neg P(x))$$

- Hay un triángulo al sur de todos los círculos

$$\exists x(T(x) \wedge \forall y(C(y) \rightarrow Su(x, y)))$$

- No hay dos triángulos en el mismo renglón

$$\neg \exists y \exists x(T(x) \wedge T(y) \wedge R(x, y))$$

- Hay un círculo tal que todos los círculos al oeste de él son grandes.

$$\exists x(C(x) \wedge \forall y(C(y) \wedge O(y, x) \rightarrow G(y)))$$

- Ningún cuadrado está al norte de un círculo grande.

$$\neg \exists x(S(x) \wedge \exists y(C(y) \wedge G(y) \wedge N(x, y)))$$

- Todos los círculos medianos están al oeste de un mismo triángulo grande

$$\exists x(T(x) \wedge G(x) \wedge \forall y(C(y) \wedge M(y) \rightarrow O(y, x)))$$

- Todos los cuadrados pequeños están al sur de cualquier triángulo.

$$\forall x(S(x) \wedge P(x) \rightarrow \forall y(T(y) \rightarrow Su(x, y)))$$

- Si dos cuadrados están en el mismo renglón entonces cualquier triángulo al sur de ambos es mediano.

$$\forall x \forall y(S(x) \wedge S(y) \wedge R(x, y) \rightarrow \forall z(T(z) \wedge Su(z, x) \wedge Su(z, y) \rightarrow M(z)))$$

- No hay dos triángulos medianos en la misma columna y si un triángulo es grande entonces hay un círculo pequeño al este de él.

$$\neg \exists x \exists y(T(x) \wedge T(y) \wedge Co(x, y)) \wedge \forall z(T(z) \wedge G(z) \rightarrow \exists w(C(w) \wedge P(w) \wedge E(w, z)))$$